

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

MODELOVÁNÍ PROPAGACE SIGNÁLU BEZDRÁTOVÝCH
SÍTÍ LTE A WIFI UVNITŘ BUDOV

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAROSLAV OLBERT

Brno 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

MODELOVÁNÍ PROPAGACE SIGNÁLU BEZDRÁTOVÝCH SÍTÍ LTE A WIFI UVNITŘ BUDOV

MODELING OF SIGNAL PROPAGATION IN WIRELESS LTE AND WIFI NETWORKS IN INDOOR
DEPLOYMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jaroslav Olbert

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Hošek, Ph.D.

BRNO 2017



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Jaroslav Olbert

ID: 154822

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Modelování propagace signálu bezdrátových sítí LTE a WiFi uvnitř budov

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V diplomové práci bude pozornost soustředěna na propagaci rádiového signálu uvnitř budov. Teoretická část práce bude zaměřena na popis technik "ray tracing" a "ray launching", které jsou v současné době využívány pro simulaci propagace signálu ve frekvenčním rozsahu 5 - 72 GHz. Praktická část práce bude zahrnovat tvorbu 3D modelu prostor Ústavu telekomunikací (5NP), který bude využit jako vstupní databáze dat pro následnou tvorbu frameworku ve vybraném simulačním prostředí (Matlab či Network Simulator 3). Výstupem simulace bude výpočet parametrů (např. síla přijatého signálu) pro zvolené pozice vysílače a přijímače.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] JANASWAMY, Ramakrishna. c2001. Radiowave propagation and smart antennas for wireless communications: getting started with Python. 3rd ed. Boston: Kluwer Academic Publishers. ISBN 07-923-7241-7.

[2] ATTAWAY, Stormy. 2016. Matlab: a practical introduction to programming and problem solving. 4th edition. Cambridge, MA: Elsevier. ISBN 978-012-8045-251.

Termín zadání: 1.2.2017

Termín odevzdání: 24.5.2017

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Hošek, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou modelování propagace signálu bezdrátových sítí uvnitř budov. Teoretická část práce se věnuje principům a metodám šíření elektromagnetických vln ve venkovním prostředí i uvnitř budov. Dále jsou popsány metody výpočtů propagace signálu ray-launching a ray-tracing. V závěru první části je popsán algoritmus a vzorce, použité pro simulaci šíření signálu 5 GHz WiFi uvnitř prostor UTKO. Druhá polovina práce obsahuje popis modulu mmWave, který byl využit pro simulace standardu 802.11ad (WiGig) a následně výsledky získané simulacemi v simulátoru NS-3, jejich rozbor a porovnání s výsledky získanými měřeními v reálném prostředí.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektromagnetické vlny, milimetrové vlny, mmWave modul, modelování, Network Simulator, NS-3, šíření signálu, ray-launching, ray-tracing, WiFi, WiGig

ABSTRACT

Masters thesis deals with the problematics of wireless signal propagation modeling inside buildings. The theoretical part of this thesis describes principles and methods of electromagnetic waves spreading in open areas and in indoor deployment. There are also described methods used for calculating the path of signal propagation ray-launching and ray-tracing. This part also includes description of an algorithm and equations used for simulating 5GHz WiFi signal propagation inside the Department of telecommunications corridors. Second part of this thesis includes a description of a NS-3 module mmWave, which was used for simulations of IEEE 802.11ad (WiGig) standard. There are also results of these simulations and their detailed description. At the end of this thesis comparison of these results with values gained by real environment measurements can be found.

KEYWORDS

Electromagnetic waves, millimeter waves, mmWave module, modelling, Network Simulator, NS-3, signal propagation, ray-launching, ray-tracing, WiFi, WiGig

OLBERT, Jaroslav *Modelování propagace signálu bezdrátových sítí LTE a WiFi uvnitř budov*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2017. 54 s. Vedoucí práce byl Ing. Jiří Hošek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Modelování propagace signálu bezdrátových sítí LTE a WiFi uvnitř budov“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor(ka) uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Jiřímu Hoškovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....
podpis autora(-ky)

OBSAH

Úvod	11
1 Elektromagnetické vlnění	12
1.1 Šíření obecných elektromagnetických vln	12
1.1.1 Šíření vln ve volném prostoru	12
1.1.2 Šíření vln uvnitř budov	13
1.1.3 Metoda ray tracing	15
1.1.4 Metoda ray launching	16
1.2 Šíření mikrovln ve frekvenčním rozsahu od 2 do 60 GHz	17
1.2.1 Modely predikce propagace signálu	17
1.2.2 Srovnání pásma 2,4 GHz a 5 GHz	18
1.2.3 Standard IEEE 802.11ad (WiGig)	21
2 Vytváření 3D modelu	23
2.1 Volba vhodného softwaru	23
2.2 Tvorba modelu	23
3 Popis použitého algoritmu	26
3.1 Principy modelování propagace za použití paprsků	26
3.1.1 Popis fyzického bloku	27
3.2 Získané výsledky	29
4 Výsledky studentské práce	30
4.1 Network Simulator NS-3	30
4.2 Propagační modul mmWave pro NS-3	31
4.2.1 mmWave framework	31
4.2.2 Výsledky simulací frameworku mmWave	37
5 Získané výsledky	38
5.1 Popis použitého modelu	39
5.2 Získané výsledky	41
5.3 Porovnání s výsledky reálného měření	46
6 Závěr	50
Literatura	51
Seznam symbolů, veličin a zkratek	53

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Způsoby reakce vlny na překážku.	13
1.2	Příklad vícecestného šíření paprsků	15
1.3	Využití metody ray tracing v budově [6].	16
1.4	Rozmístění přenosových kanálů WiFi v pásmu 2,4 GHz s vyznačenými nepřekrývajícími se kanály.	19
1.5	Rozmístění přenosových kanálů WiFi v pásmu 5 GHz.	19
1.6	Rozmístění bezlicenčních pásem standardu IEEE 802.11ad.	21
2.1	Uzavřený 3D model 5. NP.	24
2.2	Otevřený 3D model 5. NP.	24
2.3	Půdorys 5. NP budov C, D, E Fakulty elektrotechniky a komunikač- ních technologií Technická 12, Brno Královo pole.	25
3.1	Modelování vysílače v podobě idealizované koule pro vyzařování a) 12 paprsků, b) 50 paprsků, c) 1000 paprsků [12].	27
3.2	Kellerův kužel	28
3.3	Grafické znázornění získaných výsledků.	29
4.1	Diagram tříd modulu mmWave [17].	32
4.2	Struktura rámce v modelu mmWave [18].	33
4.3	Průměrná hodnota SINR odhadnuta uživateli [17].	37
4.4	Přenosová rychlost uživatelů ve scénáři LoS a NLoS [17].	37
5.1	Průměrná přenosová rychlost protokolu TCP.	42
5.2	Průměrná hodnota SINR protokolu TCP.	42
5.3	Průměrná přenosová rychlost protokolu UDP.	43
5.4	Průměrná hodnota SINR protokolu UDP.	44
5.5	Průměrná přenosová rychlost na fyzické vrstvě.	45
5.6	Průměrná hodnota SINR na fyzické vrstvě.	45
5.7	Průměrná přenosová rychlost na fyzické vrstvě. [20]	47
5.8	Průměrná přenosová rychlost protokolu TCP [20].	47
5.9	Průměrná přenosová rychlost protokolu UDP [20].	48
5.10	Zařízení použita při měření v budově FEKT [20].	48

SEZNAM TABULEK

1.1	Rozložení kanálů 5 GHz WiFi podle EN 301 893 v1.8.1.	20
1.2	Rozložení kanálů 2,4 GHz WiFi podle EN 300 328 v1.9.1.	20
4.1	Parametry ke konfiguraci struktury rámce [17].	35
5.1	Parametry simulace.	38
5.2	Příklad získaných hodnot ze souboru <i>RxPacketTrace.txt</i> (pouze první 4 řádky).	41
5.3	Parametry použitého vybavení [20].	46

ÚVOD

Diplomová práce je věnována možnostem modelování propagace signálů bezdrátových mobilních sítí LTE a IEEE 802.11 uvnitř budov, zejména pokrytí prostor Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií (FEKT), především Ústavu telekomunikací (UTKO), experimentální mobilní sítí LTE a nově nastupující technologií WiGig (IEEE 802.11ad).

Obsahem této práce je teoretický rozbor a následná implementace zadaného tématu, kdy každá z těchto částí se zabývá možnostmi a metodami šíření signálů bezdrátových sítí. Cílem této práce je vytvoření funkčního 3D modelu zastupujícího prostory, ve kterých budou prováděny simulace šíření signálu a následně provedení zmíněných simulací v programu Network Simulator 3 (NS-3) se zaměřením na získání přenosové rychlosti.

Úvodní část diplomové práce je věnována teoretickému rozboru principů šíření bezdrátových rádiových signálů a rozdílů mezi propagací ve venkovních a vnitřních prostorech. Práce obsahuje informace o metodách výpočtu „ray launching“ a „ray tracing“, sloužících pro teoretické výpočty tras šíření vlnění. Konec této části je zaměřen na propagaci signálu ve frekvenčním rozsahu 2-60 GHz.

Druhá část práce se zabývá popisem vytváření 3D modelu prostor UTKO. Obsahuje rovněž zdůvodnění výběru použitého softwaru a dále podobu samotného modelu.

Následující část je věnována popisu algoritmu, kterého bylo využito při výpočtu propagace v MATLABu. Jsou zde uvedeny, mimo jiné, i použité vzorce a výsledky první zkušební simulace v grafické podobě. Použitý algoritmus provádí simulaci na 5 GHz WiFi.

Čtvrtá část je již věnována popisu nástrojů, kterých bylo využito pro simulování šíření signálu. Jedná se o popis simulátoru NS-3 a především jednoho z jeho modulů – mmWave, který umožňuje v simulátoru provádět simulace za použití technologií standardu IEEE 802.11ad. Tato práce obsahuje podrobný popis modulu včetně jednotlivých jeho částí. Jsou zde uvedeny i některé jeho důležité parametry, které byly pro provádění simulací klíčové. Na konci této části jsou stručně popsány výsledky simulací, které byly provedeny samotnými tvůrci modulu z Technické univerzity New York (NYU).

Závěrečná část práce obsahuje detailní popis výsledků simulací. Jsou zde k nalezení mimo jiné grafy získaných hodnot a jejich popis. V úplném závěru práce se nachází srovnání výsledků provedených simulací s hodnotami, které byly naměřeny v reálném prostředí prostor FEKT UTKO.

1 ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ

Podle teorie Jamese Clerka Maxwella, který v roce 1864 matematicky popsal koncept elektřiny a magnetismu, je možné přenášet elektrickou energii volným prostorem rychlostí, která má konečnou velikost a je v souladu s rychlostí světla, pomocí elektrických a magnetických vln.

O 22 let později dokázal Heindrich Rudolf Hertz, že rádiové vlny jsou ve skutečnosti elektromagnetické vlny a ověřil Maxwellovu teorii experimentem, při kterém použil frekvence v rozsahu cca 50 až 500 MHz. Díky tomuto experimentu mohl pozorovat dva jevy doprovázející šíření vln – odraz a rozptyl.

Provedené experimenty, včetně toho Hertzova, ukázaly, že vzduch, jako prostředí, je velmi vhodný pro šíření informací pomocí elektromagnetických vln a to zejména na delší vzdálenosti. Toto zjištění výrazně přispělo k vývoji nových technologií v oblasti sdělovací techniky až do dnešní podoby [1].

1.1 Šíření obecných elektromagnetických vln

Šíření elektromagnetických vln ovlivňuje mnoho faktorů, zejména však vlastní prostředí, ve kterém se vlny šíří. Dalším důležitým faktorem je vlnová délka vlny a jí odpovídající frekvence. Vztah mezi vlnovou délkou λ a frekvencí f , za předpokladu, že se vlna ve volném prostředí pohybuje rychlostí $c \cong 3 \cdot 10^8 m/s$, je dán vztahem

$$\lambda = \frac{c}{f}. \quad (1.1)$$

Tato práce je zaměřena převážně na kmitočty, využívané v systémech standardu IEEE 802.11 a LTE (mobilní síť čtvrté generace – Long Term Evolution), tedy v rozsahu přibližně od 2 do 60 GHz.

1.1.1 Šíření vln ve volném prostoru

Vlny lze rozlišit podle základních mechanismů šíření na ty, které jsou relativně blízko k zemskému povrchu, dále ty, které se vyskytují ve větších výškách, resp. v jednotlivých vrstvách atmosféry a konečně na ty, nacházející se v kosmu.

Pro potřeby této práce bude pozornost soustředěna na vlny šířící se v těsné blízkosti povrchu Země.

Přímá vlna

Přímá elektromagnetická vlna je taková vlna, která se šíří přímočaře, ovšem díky vrstevnatému profilu zemské atmosféry dochází k jejímu lomu a zdánlivému ohybu.

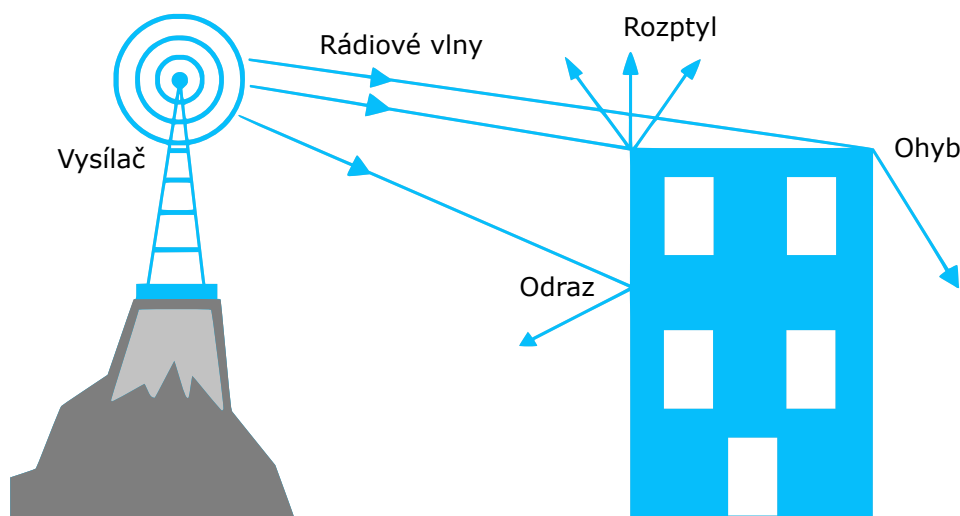
Obecně tedy o přímé vlně hovoříme jako o paprsku, který se šíří přímočaře po nejkratší možné optické trase v nejmenším čase.

Odražená a rozptýlená vlna

Pokud vlna dopadne na zemský povrch, dochází v závislosti na nerovnostech povrchu a její vlnové délce buď k jejímu rozptylu, odrazu nebo k průchodu překážkou. Výsledkem odrazu vlny je, že vlna, které dopadla na povrch překážky, se pod stejným úhlem od tohoto povrchu odrazí zpět do prostředí a pokračuje dále tímto směrem. Rozptyl vlny je stav, kdy se v místě odrazu vlna odrazí do více směrů. K rozptylu také dochází, pokud vznikne nové vlnění na velkém počtu náhodně situovaných částic, na které původní vlnění dopadá.

Průchod vlny nastane, pokud je vlna schopna dostat se na druhou stranu překážky po narázu do ní. V této situaci může zároveň dojít také k odrazu, nebo rozptylu dopadající vlny.

Podmínky a následky dopadu vlny není jednoduché obecně popsat, jelikož výsledek vždy závisí na okolnostech, které se pokaždé liší [2].



Obr. 1.1: Způsoby reakce vlny na překážku.

1.1.2 Šíření vln uvnitř budov

Průběh šíření elektromagnetických vln uvnitř budov pracuje na obdobných principech, jako šíření ve volném prostoru. Ovšem z důvodu menších prostor a většího počtu překážek (nábytek, zdi, okna, dveře, apod.) zde dochází k mnohonásobně většímu počtu odrazů a rozptylů vln. Následkem tohoto jevu může dojít například

k tomu, že signál k přijímači dorazí vícekrát po různých trasách a v různých časových intervalech, nebo v horším případě nedorazí vůbec, jelikož útlum signálu již vzrostl na neúnosnou hodnotu.

V důsledku prezence značného množství překážek je tedy šíření vlnění uvnitř budov, oproti šíření ve volném prostoru, značně komplikovanější a náročnější na popsatí.

Odraz vlny Jak již bylo řečeno, odraz nastane, pokud elektromagnetická vlna dopadne na povrch objektu, který má velké rozměry v porovnání s vlnovou délkou vlnění a zároveň je tento povrch dostatečně hladký, aby nedošlo k rozptylu. Ve skutečnosti nedochází k odrazům pouze na metalických površích, ale také dielektrika a izolanty mohou způsobit odraz vlny. Uvnitř budovy může dojít k odrazu například od stěny místnosti, okenní tabule nebo od dveří skříně.

Rozptyl vlny Rozptyl paprsku je způsoben nárazem na povrch objektu, který obsahuje velké množství nerovností, které jsou vzhledem k vlnové délce vlnění malé. Dochází k němu tedy na objektech s hrubým povrchem, na velmi malých předmětech, nebo v případě jiných nepříznivých neregulárností v cestě šíření [3].

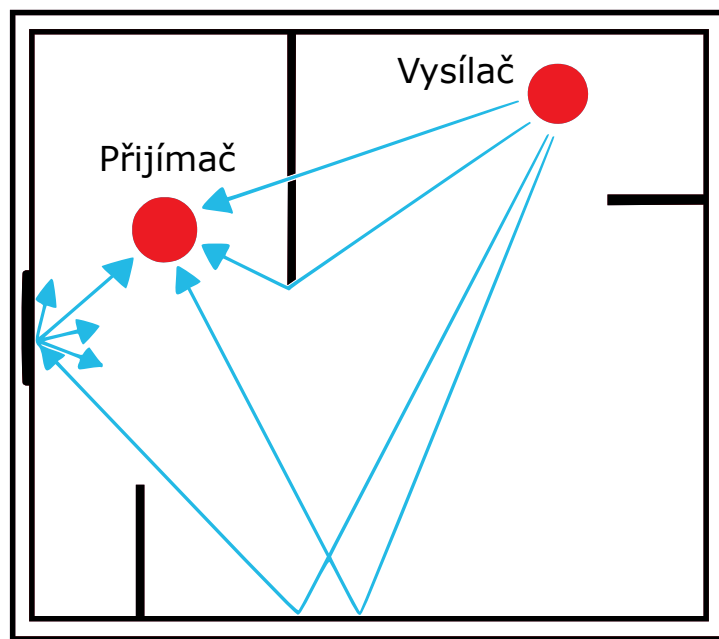
Ohyb vlny V případě, že se mezi vysílačem a přijímačem nachází objekt s ostrými hranami, může dojít k odklonu původního směru šíření paprsku, tedy k jeho ohybu.

Průchod vlny Kromě výše zmíněných efektů dopadu paprsku na objekt, které se týkají zpravidla pouze povrchu samotného objektu, existuje ještě jedna možnost reakce vlny na překážku. Za vhodných podmínek může paprsek projít skrze objekt, který mu stojí v cestě a pokračovat tak dále ve své cestě. Jaký efekt na směr paprsku a jeho vlastnosti tento průnik zanechá závisí na mnoha faktorech, zejména však na výkonu vysílaného signálu a na materiálu, kterým je překážka tvořena.

Pomocí těchto jevů lze částečně určovat směr šíření signálu a tím například nasměrovat paprsek i tam, kde neexistuje přímá cesta od vysílače k přijímači (Line of Sight – LOS). Na druhou stranu velmi často dochází k nechtěným efektům s tímto spjatým. Jedním z takových efektů je vícecestné šíření elektromagnetického vlnění.

Vícecestné šíření K vícecestnému šíření vlny dochází, pokud se vyskytne více než jedna cesta, kterou se vlnění může šířit. Tato situace nastává po mnohonásobném rozptylu a odrazu vlny. Tyto jevy tedy způsobují to, že vzniká více možných cest, kterými se signál může šířit od vysílače k přijímači, kromě cesty přímé.

V reálném prostředí dochází k vícecestnému šíření kombinací všech tří případů efektů propagace elektromagnetických vln. Ve výsledku je tedy přijímaný signál součtem všech náhodných signálů, které přijímač obdrží ze všech směrů a úhlů. Některé z těchto signálů podpoří původní přímý signál, některé mohou naopak způsobovat rušení a ztráty [3].



Obr. 1.2: Příklad vícecestného šíření paprsků

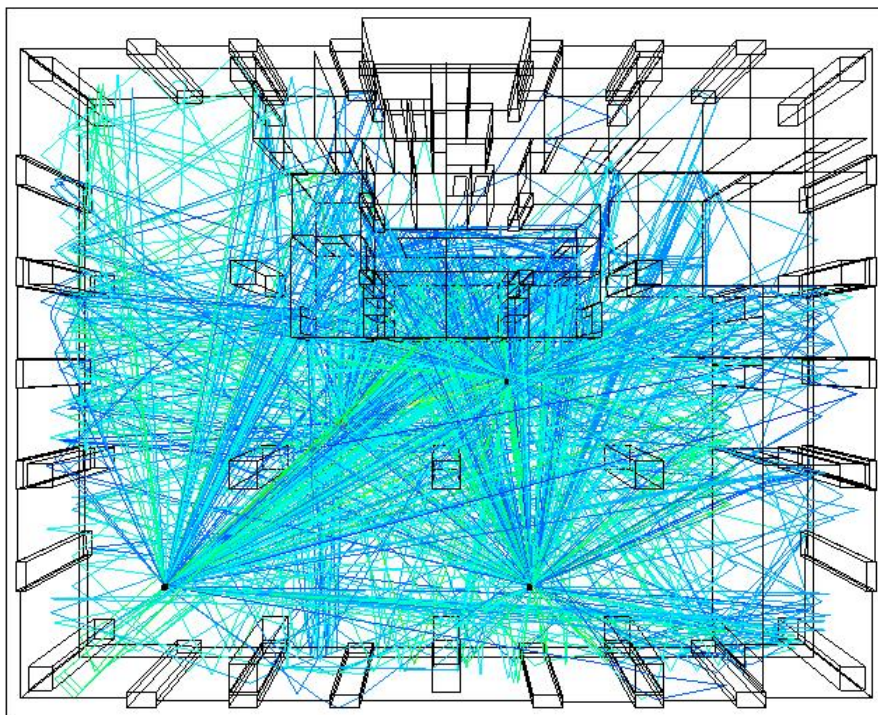
1.1.3 Metoda ray tracing

Tato metoda slouží ve fyzice k výpočtu trasy, kterou se vlna šíří prostředím s tím, že výpočet trasy probíhá směrem od přijímače a je vhodná spíše pro scénáře point-to-point. Počítá tedy s efekty spojenými s šířením vlnění a snaží se určit teoretickou cestu, kterou se paprsek v daném prostředí bude ubírat. Používá se při tom opakování idealizovaných přímých vln, které jsou použity pro zjednodušení výpočtů.

Způsob výpočtu probíhá tak, že tyto velmi krátké přímé paprsky prochází prostředím s různým indexem lomu. Výpočet tedy určí směr, kterým se bude tento paprsek ubírat, pokud vstoupí do prostředí s jiným indexem lomu. Z tohoto prostředí vyjde nový paprsek s novým směrem a proces se opakuje, až do samého cíle cesty vlnění. Pokud dojde ke kolizi s předmětem, kterým paprsek nedokáže projít, dojde k novému výpočtu směru šíření a proces se opět opakuje.

Vlastnosti jako intenzita, vlnová délka a polarita značně ovlivňují výsledky výpočtu a je potřeba brát na ně zřetel.

Pro výpočet je rovněž nezbytné, aby vysílač byl umístěn na fixní pozici a nebylo s ním nijak pohybováno. Naopak přijímač se musí pohybovat po ploše, která je předmětem zkoumání. Z toho plyne, že časová náročnost této metody je spjata s počtem výpočetních bodů [4][5].



Obr. 1.3: Využití metody ray tracing v budově [6].

1.1.4 Metoda ray launching

Na rozdíl od metody „ray tracing“ počítá metoda „ray launching“ trasu šíření paprsku od vysílače. Tato metoda je vhodná spíše pro scénáře s více příjemci, tedy point-to-many, a je tedy vhodnější např. pro plánování bezdrátových sítí a optimalizaci vnitřních realizací bezdrátových sítí. Také lze snadněji predikovat pokrytí prostoru. Je obecně více početně efektivní než ray tracing a poskytuje relativně akceptovatelnější úroveň přesnosti.

K výpočtům se využívá vzorkování obrazu, které počítá s diskrétními paprsky s danými úhly. Tímto nevyhnutelně vznikají mezery v prostoru, poté, co dojde k odrazu, nebo rozptylu paprsků. Tento problém lze vyřešit pomocí tzv. *reception sphere* neboli přijímací koule. Pro lepší výsledek může být vysláno více paprsků, nicméně tato akce bude mít nevyhnutelně za následek zpomalení výpočtů.

Obecně lze říci, že metoda ray launching prochází jednotlivé paprsky a počítá odrazy, rozptyly a průchody iterativně. Pixel obrazu tedy získá informace z ostatních pixelů na stejné trase [5].

1.2 Šíření mikrovln ve frekvenčním rozsahu od 2 do 60 GHz

Elektromagnetické vlnění s kmitočtem od 2 GHz se nazývá mikrovlnné záření, anglicky SHF (velmi vysoké frekvence – Super High Frequency). Toto frekvenční pásmo je také známo jako centimetrové, popř. milimetrové pásmo, podle vlnových délek, které nabývají hodnot od jednotek milimetrů až do 10 cm a díky tomu využívají mikrovlny přímé paprsky pro komunikaci bod–bod. Frekvence v tomto rozsahu se nejčastěji používají pro satelitní komunikaci, radarovou komunikaci, v bezdrátových LAN (lokální počítačová síť – Local Area Network) sítích, ale i v mikrovlnných troubách [7].

Vlastnosti šíření milimetrových a centimetrových vln se blíží vlastnostem šíření světla. Za překážkami, které stojí vlnám v cestě, se vytvářejí stíny, podobně jako u světla. S rostoucími kmitočty rovněž klesá dosah záření a schopnost procházek skrze překážky. Při plánování výstavby budovy je potřeba předem zohlednit vliv její konstrukce na šíření vlnění uvnitř i vně [8].

1.2.1 Modely predikce propagace signálu

I přesto, že již bylo provedeno velké množství experimentů, zkoumajících vliv okolního prostředí na propagaci vlnění, u většiny z nich bylo využito některého z modelů predikce. Ačkoliv těchto modelů existuje hned několik, není stále možné přesně předpovědět, jak se vlnění v daném prostředí zachová. Právě z tohoto důvodu budou v následující části popsány nejčastěji implementované modely predikce propagace signálů.

Model Okumura-Hata

Tento model je využíván především pro predikci šíření signálu v zastavěných oblastech s přímou i nepřímou cestou mezi vysílačem a přijímačem. K výpočtu se využívá vzdálenost mezi anténami, frekvence vlnění a další parametry, jako například výkon vysílací antény, její výška, výška okolních budov a terénu.

Rovnice pro výpočet útlumu L_H signálu u tohoto modelu má následný tvar:

$$L_H (dB) = 69,55 + 26,16 \log(f) - 16,82 \log(h_t) - a(h_r) + (44,9 - 6,55 \log(h_t)) \log(d), \quad (1.2)$$

kde f je kmitočet vlnění v GHz, d je vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem v km, h_t a h_r je výška vysílače a přijímače [8].

COST-231 model

Model COST-231 je rozšířením modelu Okumura-Hata a používá se z pravidla pro frekvence okolo 2 GHz. Obdobně jako u předchozího modelu, najde i tento využití při predikci šíření signálu v zastavěných oblastech.

Rovnice pro výpočet útlumu L_{231} signálu u tohoto modelu má poté následný tvar:

$$L_{231} (dB) = 46,3 + 33,9 \log(f) - 13,82 \log(h_t) - a(h_r) + (44,9 - 6,55 \log(h_t)) \log(d) + C, \quad (1.3)$$

kde C je konstanta, která nabývá hodnot

- pro hustě zastavěné oblasti 3 dB,
- pro řídce zastavěné oblasti 0 dB [8], [9].

Log-distance model

Na rozdíl od předchozích dvou, tento model se zabývá predikcí propagace signálu přímo uvnitř budovy. Už předem se očekává, že s rostoucí vzdáleností vysílače od přijímače bude útlum signálu exponenciálně růst. Z pravidla je rovnice pro útlum vyjádřena:

$$L_L (dB) = L_0 + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_g, \quad (1.4)$$

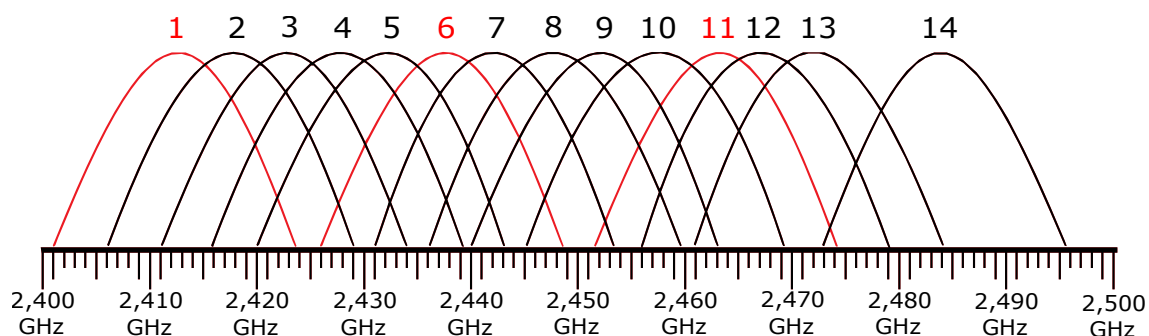
kde L_0 je útlum na referenční vzdálenosti d_0 , d je vzdálenost přijímače od vysílače, γ je exponent útlumu a X_g je Gaussova náhodná veličina s nulovou střední hodnotou [9].

1.2.2 Srovnání pásma 2,4 GHz a 5 GHz

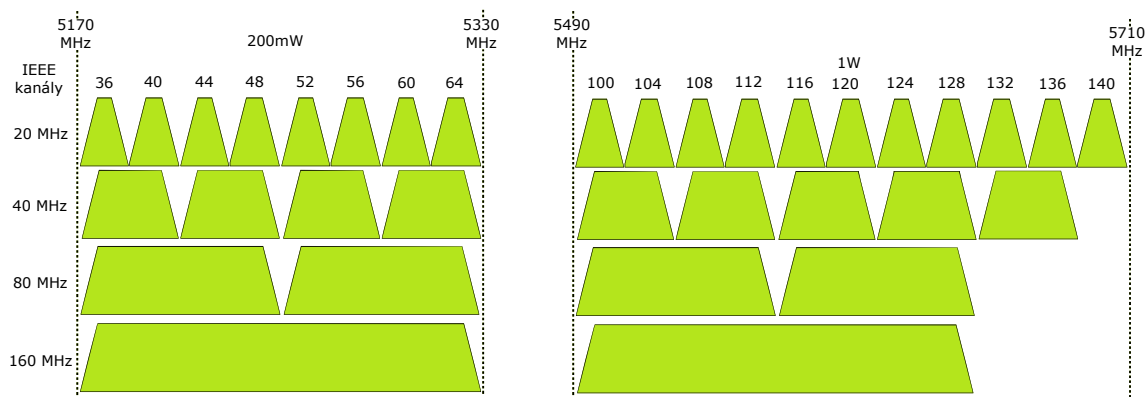
S rostoucí frekvencí klesá vzdálenost, na kterou je vlnění se schopno šířit. Z toho tedy plyne, že pokud je zapotřebí pokrýt prostředí pokrývající velkou plochu, z finančního hlediska je lepší využít systémy pracující na nižších kmitočtech, kterým bude stačit

pouze malé množství vysílačů. Využitím nižších kmitočtů přenosových signálů se ovšem snižuje přenesený výkon. Vyšší frekvence, na druhou stranu, umožňují vyšší přenosové rychlosti jak v uplinku, tak v downlinku [10].

Frekvenční pásmo 2,4 GHz, hojně využívané v bezdrátové komunikaci, je široké pouze 80 MHz, což nabízí maximálně pouze tři vzájemně se nepřekrývající kanály. Oproti tomu pásmo 5 GHz poskytuje daleko větší množství vzájemně se nepřekrývajících kanálů (celkem 23 při šířce pásma 20 MHz), čímž umožňuje navýšení přenosové kapacity.



Obr. 1.4: Rozmístění přenosových kanálů WiFi v pásmu 2,4 GHz s vyznačenými nepřekrývajícími se kanály.



Obr. 1.5: Rozmístění přenosových kanálů WiFi v pásmu 5 GHz.

Hlavními rozdíly jsou tedy šířka kanálů, dosah, přenosová rychlost a samozřejmě frekvence. Obecně lze říci, že pokud je potřeba implementovat vyšší přenosovou rychlost, doporučuje se využít 5 GHz WiFi. To samé platí i pokud by bylo potřeba odstranit vzájemné rušení více zařízení na frekvenci 2,4 GHz. Naopak pokud je hlavní prioritou pokrytí co největšího území, najde své uplatnění právě technologie s 2,4 GHz.

Tab. 1.1: Rozložení kanálů 5 GHz WiFi podle EN 301 893 v1.8.1.

Pásmo	Kanál	Frekvence [MHz]
Pásmo A UNII-1 Spodní	36	5170-5190
	40	5190-5210
	44	5210-5230
	48	5230-5250
Pásmo A UNII-2 Střední	52	5250-5270
	56	5270-5290
	60	5290-5310
	64	5310-5330
Pásmo B UNII-1 Rozšířené	100	5490-5510
	104	5510-5530
	108	5530-5550
	112	5550-5570
	116	5570-5590
	120	5590-5610
	124	5610-5630
	128	5630-5650
	132	5650-5670
	136	5670-5690
Pásmo C UNII-3 Horní	140	5690-5710
	149	5735-5755
	153	5755-5775
	157	5775-5795
	161	5795-5815

Tab. 1.2: Rozložení kanálů 2,4 GHz WiFi podle EN 300 328 v1.9.1.

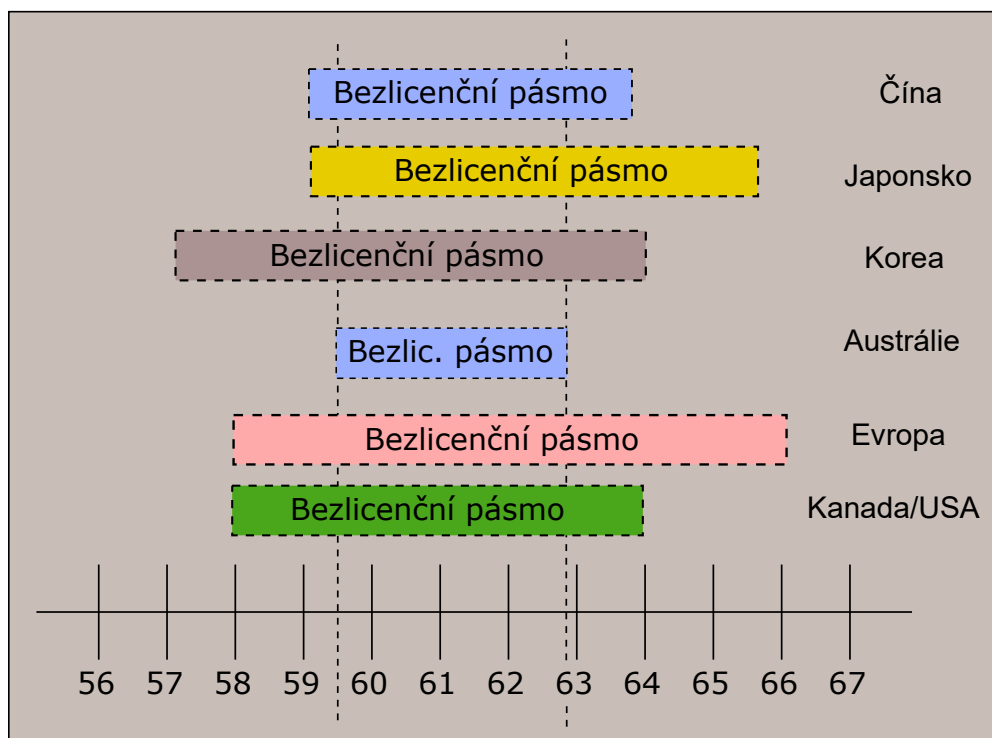
Kanál	Frekvence [MHz]
1	2401-2423
2	2406-2428
3	2411-2433
4	2416-2438
5	2421-2443
6	2426-2448
7	2431-2453
8	2436-2453
9	2441-2463
10	2446-2468
11	2451-2473
12	2456-2478
13	2461-2483
14	2473-2495

Při plánování bezdrátové sítě je také potřeba počítat s tím, že pásmo 2,4 GHz je v dnešní době takřka přeplněno a může tak docházet k rušení okolními zdroji, vysílajícími signály o stejné frekvenci [10].

1.2.3 Standard IEEE 802.11ad (WiGig)

Vzrůstající nároky na množství přenášených dat pomocí bezdrátových sítí stále narůstají a stávající sítě tak již v současné době často nedokáží uspokojit tyto požadavky. Mimo jiné i z tohoto důvodu byl vytvořen standard IEEE 802.11ad, který je, díky redukci času pro synchronizaci dat mezi dvěma zařízeními, schopen zajistit až desetinásobnou přenosovou rychlost oproti běžně používaným standardům [11]. Dokáže také zajistit rychlejší komunikaci mezi zařízeními na fyzické vrstvě.

Standard IEEE 802.11ad je doplněk standardu IEEE 802.11 pro rozšíření na multi-gigabitovou propustnost v pásmu 60 GHz. Na obrázku 1.6 je znázorněno spektrum s bezlicenčním pásmem pro daný kontinent, resp. stát. V tomto pásmu je zpravidla 7 GHz spektra určeno pro bezlicenční využití. Pro porovnání, u pásma 2,4 GHz je to pouze 83,5 MHz. Tento standard určuje 4 kanály, každý s šířkou 2,16 GHz, které jsou 54krát širší než kanály standardu IEEE 802.11n [11].



Obr. 1.6: Rozmístění bezlicenčních pásem standardu IEEE 802.11ad.

Tento standard využívá modulaci Single Carrier (SC) i ortogonální multiplex s frekvenčním dělením – Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM). OFDM umožňuje komunikaci na delší vzdálenost a lepší rozložení zpoždění. Tím je zajištěna flexibilita při zacházení s překážkami a odraženými signály. OFDM podporuje SQPSK, QPSK, 16-QAM a 64-QAM modulaci s maximální teoretickou přenosovou rychlostí na fyzické vrstvě až 6,756 Gbps. Oproti tomu modulace SC má menší

nároky na spotřebu energie a je zaměřena především na malá zařízení, jako například bezdrátové telefony. Využívá modulace $\pi/2$ -B/SK, $\pi/2$ -QPSK a $\pi/2$ -16-QAM s maximální teoretickou přenosovou rychlostí 4,620 Gbps [11].

2 VYTVÁŘENÍ 3D MODELU

Jak již bylo řečeno, cílem diplomové práce je vytvoření modelu propagace signálu uvnitř prostor Ústavu telekomunikací. Těmito prostory jsou místnosti v 5. patře budovy Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií (dále jen FEKT), sídlící na adrese Technická 12 v Brně, Králově poli.

2.1 Volba vhodného softwaru

Pro modelování 3D objektů existuje mnoho programových nástrojů a každý z nich má své specifické využití. Pro tuto práci byl jako nejvíce vyhovující zvolen softwarový balík AutoCAD od společnosti Autodesk a to zejména z těchto důvodů:

- je vhodný pro práci s 2D výkresy i modelování 3D objektů,
- výsledný model je možné exportovat do požadovaných formátů,
- díky studentské licenci je tento software pro nekomerční účely zcela zdarma.

S výběrem pomohla i skutečnost, že již byly k dispozici zpracované výkresy půdorysů 5. patra budovy FEKT, které byly poskytnuty vedením fakulty a nebylo tak třeba vytvářet výkres zcela znovu.

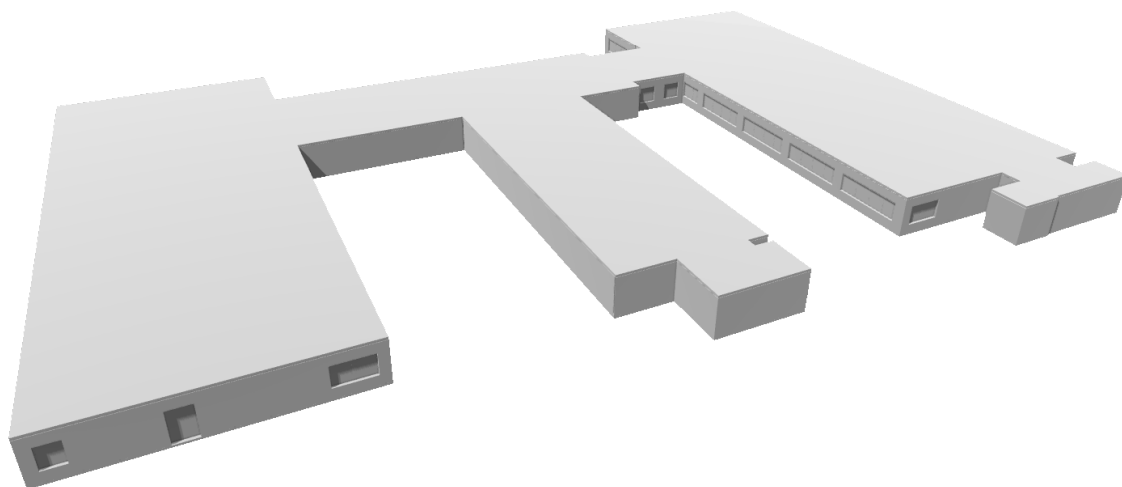
2.2 Tvorba modelu

Na počátku bylo nutné se důkladně seznámit s výkresem patra a zjistit veškeré parametry a rozměry. Po osvojení základů ovládání programu AutoCAD započala práce na modelu.

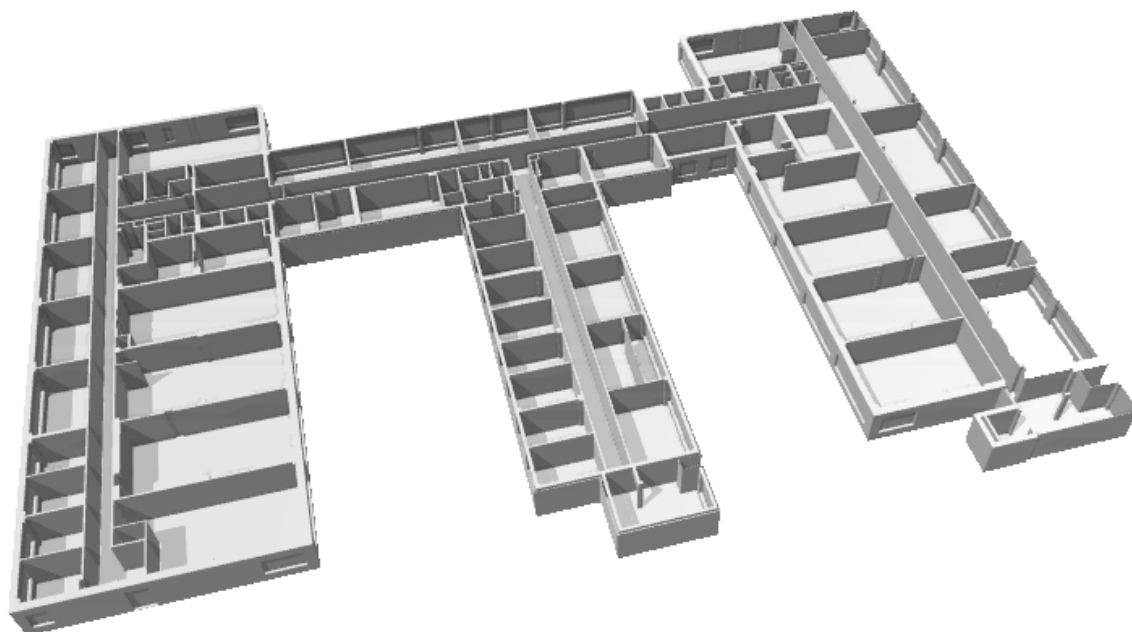
Nejdříve bylo potřeba výkres přenést do 3D modelovacího prostoru, který k osám x a y přidává třetí rozměr v podobě osy z . Poté bylo, pomocí nástroje pro tažení, vytaženo zdivo do požadované výšky. Po vytažení zdiva bylo nutné do něj vyřezat otvory pro okna a dveře a tyto následně do otvorů umístit. Dále byly, podle obvodových zdí, vytvořeny a usazeny stropy.

Následně byla upravena venkovní fasáda na prostředí bloku podlaží (budova D), která je odlišná od zbytku budovy. Na obrázku 2.2 lze vidět, že pro zjednodušení model neobsahuje žádný nábytek, ani jiné předměty, které mají na šíření vlnění také vliv.

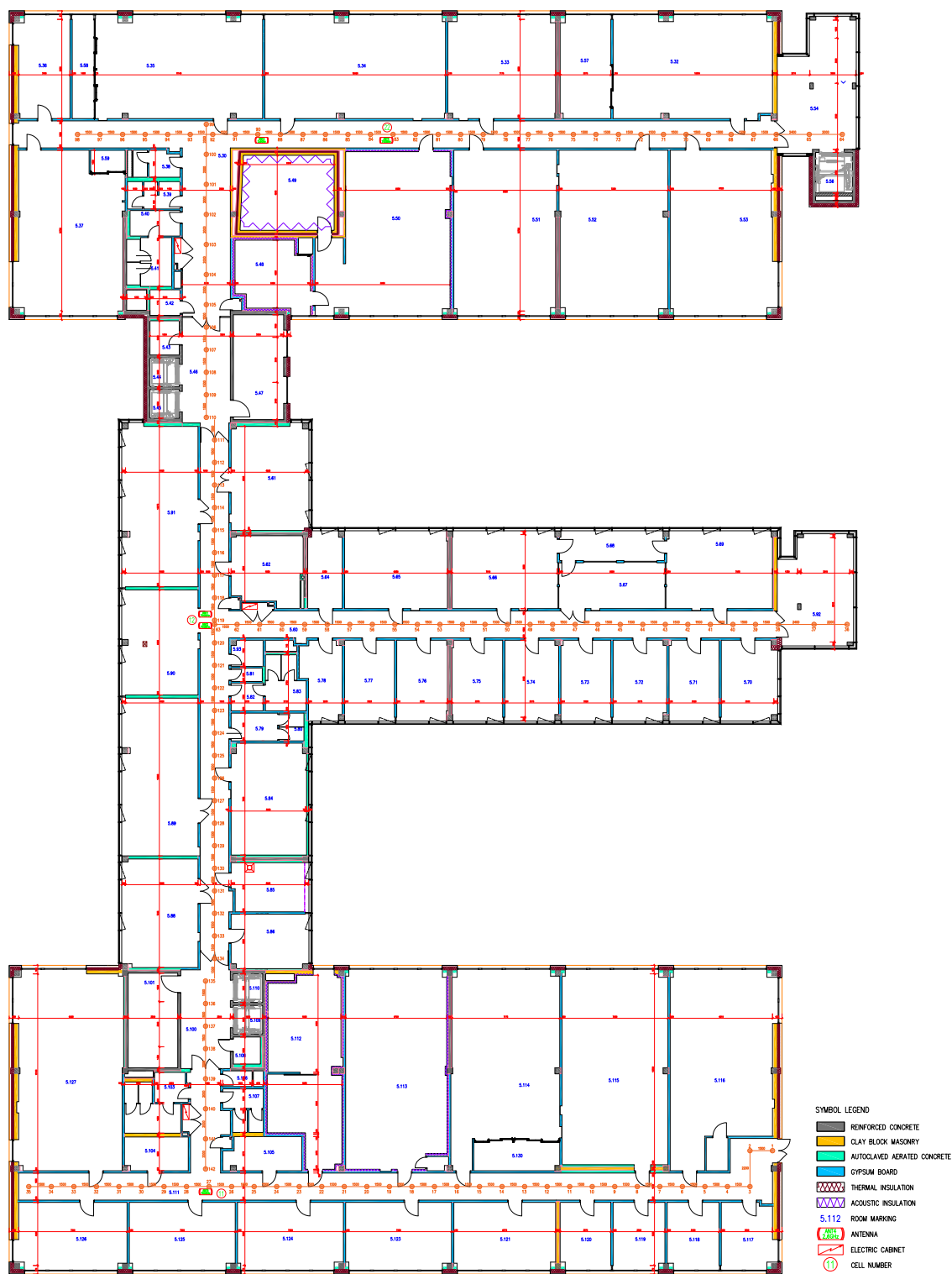
Po dokončení modelování byl objekt exportován do souboru typu *.stl*, který se mimo jiné používá i k tisku na 3D tiskárnách. Soubor je možné nalézt v příloze této práce. Model byl následně předán kolegům z Tampere University of Technology, kteří se již modelováním propagace signálů zabývají, aby jej schválili pro další účely.



Obr. 2.1: Uzavřený 3D model 5. NP.



Obr. 2.2: Otevřený 3D model 5. NP.



Obr. 2.3: Půdorys 5. NP budov C, D, E Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií Technická 12, Brno Královo pole.

3 POPIS POUŽITÉHO ALGORITMU

Pro modelování propagace signálů se zpravidla používají tři typy modelů:

- Empirický model – analytický model založen na reálných měřeních,
- Stochastický model – charakteristický využíváním statistických dat,
- Deterministický model využívající paprsky a mříže – deterministické modely vycházejí z Maxwellových rovnic a využívají se pro konkrétní případy.

Pro potřeby této práce se nejlépe jeví model deterministický, jelikož je dáno prostředí, na kterém má modelování probíhat, a zároveň není k dispozici dostatečné množství dat pro statistický model ani prostředky pro reálné měření a tvorbu empirického modelu.

3.1 Principy modelování propagace za použití paprsků

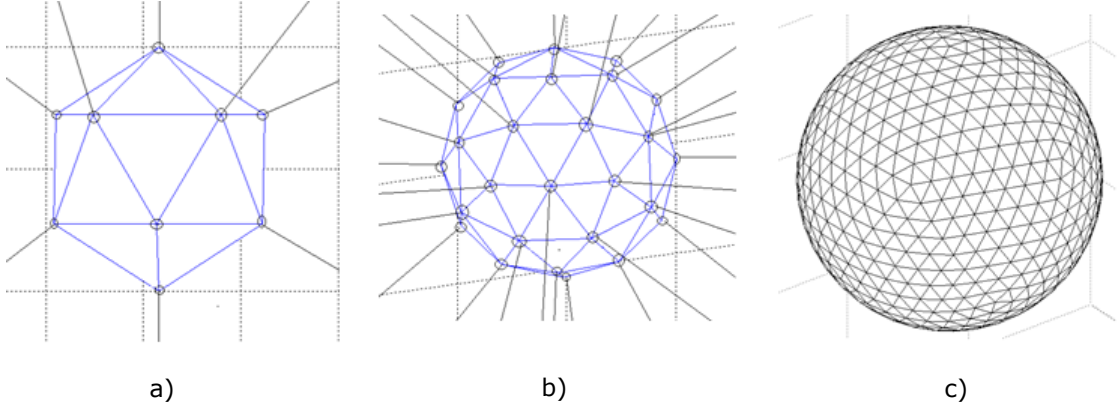
Model použitý v práci používá pro výpočet šíření signálu metodu ray-launching. Na začátku jsou definovány počáteční a koncový bod (vysílač a přijímač) a okolní prostředí, které v tomto případě tvoří prostory pátého nadpodlaží budov C,D a E Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií na adrese Technická 12, Brno.

Princip fungování algoritmu stojí na výpočtu trasy paprsků, které vycházejí z vysílače a cestují prostředím k přijímači. Aby bylo možné co nejlépe simulovat skutečné vlnění, jsou elektromagnetické vlny nahrazeny přímými paprsky, vycházejícími z vysílače. Čím větší počet takto vytvořených paprsků bude použit, tím přesnějšího výsledku je následně dosaženo. S rostoucím počtem paprsků však roste i doba simulace a náročnost hardwarových (HW) požadavků na výpočetní stanici. Tuto skutečnost je tedy potřeba uvážit ještě před započítáním simulace.

V současné době je v práci využit idealizovaný vysílač kulovitého tvaru, který je schopen vyzařovat totožné paprsky všemi možnými směry.

Samotný program je rozdělen do dvou hlavních částí – fyzický blok, sloužící k veškerým fyzikálním výpočtům a geometrický blok, který určuje cestu šíření mezi anténami.

Fyzický blok je tvořen zejména technikami zabývajícími se asymptotickými vysokými frekvencemi, které vycházejí z teorie ohybu a geometrie optiky. Jak již bylo popsáno v úvodní části práce, pokud je vlnová délka elektromagnetického vlnění několikanásobně menší, než velikost objektů okolí, lze toto vlnění nahradit přímými čarami. Díky této skutečnosti je možné v této práci použít jako vysílač právě idealizovanou kouli, která tyto čáry dokáže vyslat do libovolného směru. Aby byla zachována kontinuita a souměrnost, paprsky vycházejí ze samotného středu této koule [12].



Obr. 3.1: Modelování vysílače v podobě idealizované koule pro vyzařování a) 12 paprsků, b) 50 paprsků, c) 1000 paprsků [12].

3.1.1 Popis fyzického bloku

Veškeré výpočty prováděné programem vycházejí ze základních fyzikálních poznatků, které jsou společné i pro ostatní podobné nástroje.

Útlum, který vzniká při šíření signálu volným prostorem – přímá cesta (LOS) od vysílače k přijímači, které jsou vzájemně oddělené vzdáleností r – lze popsat použitím Maxwell-Helmholtzovou rovnicí [12]:

$$E(r) = E_0 \frac{e^{-j\beta r}}{r}, \quad (3.1)$$

kde β označuje vlnový vektor, E_0 je počáteční elektrické pole vyzařované anténou, vyjádřené jako:

$$E_0 = \sqrt{\frac{P_{TX} G_{TX} Z_0}{2\pi}}, \quad (3.2)$$

kde P_{TX} je vyzářený výkon ve watech, G_{TX} označuje zisk vysílací antény a Z_0 impedanci volného prostoru, která je rovna 120π .

V momentě, kdy elektrické pole E^i dopadne na povrch překážky, dojde k jeho odražení E^r . V okamžiku nárazu však toto pole ztrácí část své energie. V programu, který byl v této práci využit, je tento efekt popsán Fresnelovým koeficientem R^{gen} [13]:

$$\begin{vmatrix} E_{||}^r \\ E^r \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} R_{||}^{gen} & 0 \\ 0 & R^{gen} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} E_{||}^i \\ E^i \end{vmatrix}, \quad (3.3)$$

který lze vyjádřit následovně:

$$R_{\perp,\parallel}^{gen} = R_{\perp,\parallel} \left(1 - \frac{(1 - R_{\perp,\parallel}^2) \exp(-2\alpha s) \exp(-2j\beta s) \exp(jkd \sin(\theta))}{1 - R_{\perp,\parallel}^2 \exp(-2\alpha s) \exp(-2j\beta s) \exp(jkd \sin(\theta))} \right), \quad (3.4)$$

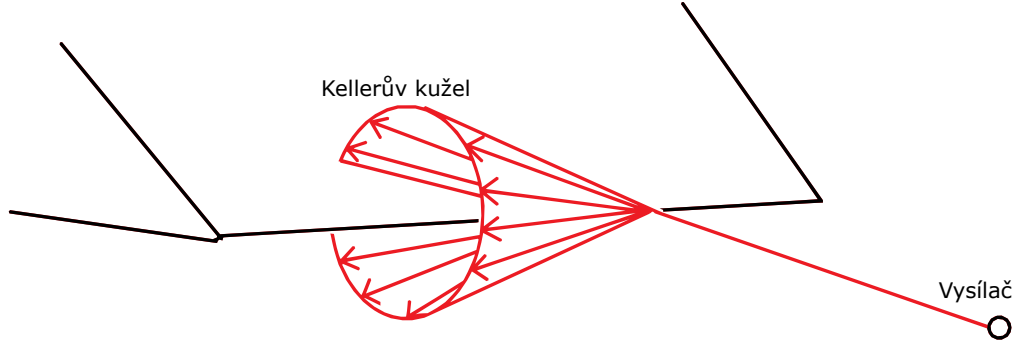
kde

$$R_{\perp} = \frac{\cos(\theta) - \sqrt{\epsilon - \sin^2(\theta)}}{\cos(\theta) + \sqrt{\epsilon - \sin^2(\theta)}}, \quad (3.5)$$

a

$$R_{\parallel} = \frac{\epsilon \cos(\theta) - \sqrt{\epsilon - \sin^2(\theta)}}{\epsilon \cos(\theta) + \sqrt{\epsilon - \sin^2(\theta)}}. \quad (3.6)$$

V rovnicích (3.4), (3.5) a (3.6) označuje θ úhel dopadu na plochu a ϵ dielektrickou permitivitu materiálu. V rovnici (3.4) jsou α a β koeficienty útlumu, s je vzdálenost, kterou vlna urazí uvnitř překážky a d značí mezeru mezi dvěma sousedními paprsky, které vznikly vnitřními odrazy.



Obr. 3.2: Kellerův kužel

V případě, že paprsky narazí na objekt menších rozměrů, dojde k ohybu nebo rozptylu paprsku. V této práci se uvažuje, že rozptyl nastane, pokud se paprsek střetne se spojem dvou rovin, jejichž vzájemný úhel se nerovná 180° . Na základě této skutečnosti lze pole ohybu E_d popsat koeficienty D_{ss} , D_{sh} , D_{hs} a D_{hh} následovně [14]:

$$\begin{vmatrix} E_{\beta}^d \\ E_{\phi}^d \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} D_{ss} & D_{sh} \\ D_{hs} & D_{hh} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} E_{\beta}^i \\ E_{\phi}^i \end{vmatrix} \sqrt{\frac{r_{td} r_{dr}}{r_{td} + r_{dr}}} \frac{e^{-j\beta r_{dr}}}{r_{dr}}. \quad (3.7)$$

V rovnici (3.7) označuje r_{td} vzdálenost od vysílače do místa ohybu, r_{dr} vzdálenost od místa ohybu k přijímači a β je vlnový vektor.

Geometricky lze tento jev popsat tzv. Kellerovým kuželem, který lze vidět na obrázku 3.2.

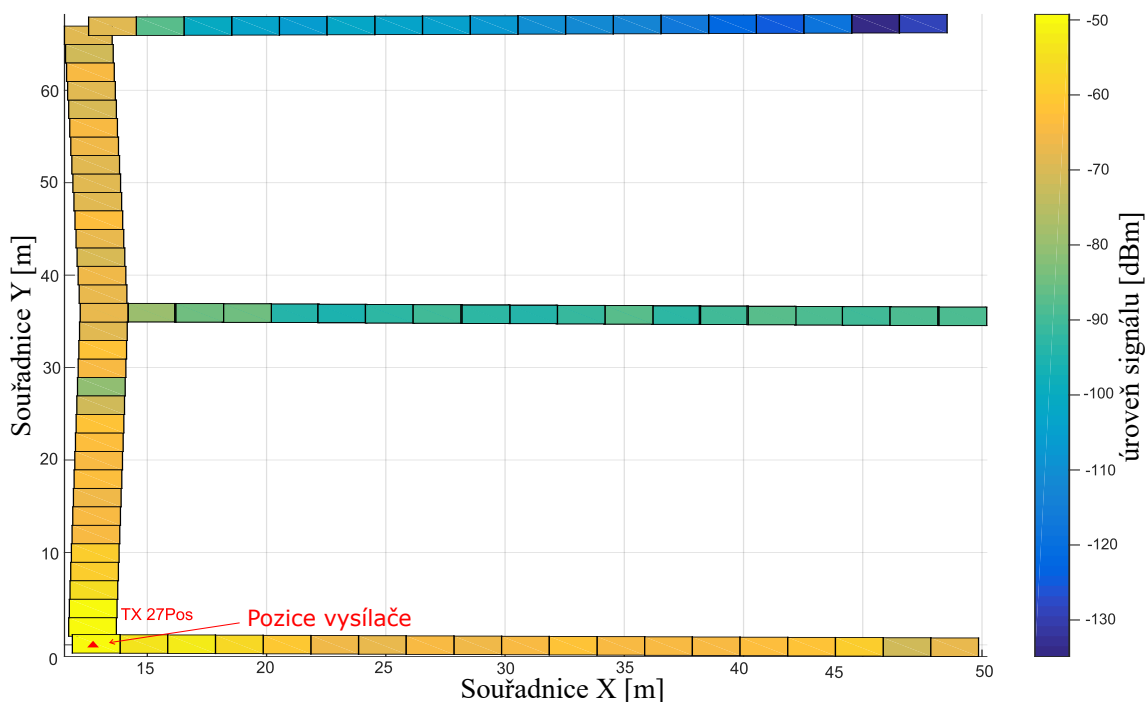
Útlum signálu v závislosti na daném povrchu předmětu je modelován pomocí koeficientu

$$\rho = R_{\perp} \exp \left(-8\pi^2 (\sigma/\lambda)^2 \cos(\theta)^2 \right), \quad (3.8)$$

kde ρ , nabývající hodnot od 0 do 1, je koeficient drsnosti povrchu. Tento koeficient bere v potaz kromě nerovnosti povrchu také nepravidelnosti ve zdech budov [15].

3.2 Získané výsledky

Výsledky první zkušební simulace (WiFi 5 GHz) lze vidět na obrázku 3.3. Ze získaných dat je patrné, že s rostoucí vzdáleností přijímače od vysílače klesá síla signálu, tak jak je to popsáno v teoretické části této práce. Pro tento výpočet byl uvažován vysílač s vysílacím výkonem 1mW, který byl umístěn do rohu budovy (pozice 27) a pro ostatní pozice byl vypočítán přijatý výkon signálu. Míra přijatého signálu v dBm je znázorněna barvami od žluté, znázorňující nejvyšší výkon, po modrou.



Obr. 3.3: Grafické znázornění získaných výsledků.

4 VÝSLEDKY STUDENTSKÉ PRÁCE

Původním záměrem této práce bylo vytvoření frameworku v Matlabu, který by sloužil k provádění simulací propagace signálu za použití vytvořeného 3D modelu. Základ tohoto frameworku měl být poskytnut kolegy z Tampere University of Technology. Naneštěstí byla tato spolupráce zkomplikována administrativou a to především problémy s podpisem dohody o mlčenlivosti. Z tohoto důvodu, po konzultaci s vedoucím práce, bylo rozhodnuto pro účely simulací využít simulátor NS-3 spolu s modulem mmWave, který byl vyvinut univerzitou New York University Polytechnic School of Engineering. Jelikož je tento modul volně šiřitelný, mohl být pro účely práce použit a upraven dle potřeby.

Následně bylo rozhodnuto o upuštění od dříve uvažované frekvence 5 GHz (WiFi), která byla nahrazena kmitočtem o hodnotě 60 GHz (WiGig). Tato změna byla uskutečněna zejména z důvodu již existujícího nastavení simulátoru na tento kmitočet a zároveň z důvodu existence výsledků měření v reálném prostředí právě při této frekvenci, které probíhalo na FEKT VUT. Výsledky ze simulátoru lze tedy snadno porovnat s reálně naměřenými hodnotami a zjistit tak odchylky teorie od praxe. Dalším důvodem pro výběr frekvence 60 GHz byla podpora standardem IEEE 802.11ad, který se v současné době již začíná v praxi využívat.

4.1 Network Simulator NS-3

Simulátor NS-3 je licencovaný, volně šiřitelný software cílený primárně pro účely výzkumu a výuky. Cílem simulátoru je tvorba a provádění simulací v daném prostředí za využití moderních síťových znalostí. Pracuje v diskrétním čase, což zajišťuje rychlejší proces simulace (proměnné se mění skokově a to pouze, pokud nastala určitá událost, která tuto změnu zapříčinila). Simulování scénářů v reálném čase by bylo příliš výpočetně i časově náročné. Na tvorbě zdrojového kódu se podílí velké množství programátorů po celém světě a to nejen z řad zkušených odborníků, ale i běžných uživatelů, kteří simulátor také využívají [16].

Samotný zdrojový kód simulátoru je psán v jazyce C++ a Python s možností využití skriptů. Pro tvorbu simulací se využívá celá řada modulů vytvořených pro specifické účely a lze tak vytvářet různé scénáře napodobující reálná prostředí. Použitelné moduly zahrnují, mimo jiné, i scénáře pro bezdrátovou komunikaci Wi-Fi, WiMAX nebo LTE s využitím dynamického směrování pro aplikace založené na protokolu IP (Internet Protokol).

NS-3 se často setkává s kritikou na základě nepodporovaných modulů, které jsou podporovány předchozí verzí simulátoru, NS-2. Zároveň také neumožňuje zpětnou

kompatibilitu s předchozí verzí a je značně časově náročný na pochopení a naučení, v porovnání se simulátory využívajícími grafické uživatelské prostředí [16]. Navzdory těmto nedostatkům byl shledán, pro účely této práce jako vyhovující.

4.2 Propagační modul mmWave pro NS-3

Vzrůstající požadavky na bezdrátové přenosy dat, současně s nedostatečným využitím frekvenčního spektra, dávají záminku pro hledání nových přenosových pásem, která by se dala pro tyto účely využít. K uspokojení poptávky je jednou z možností využití milimetrových vln. Modul mmWave poskytuje možnost využití právě milimetrových vln a stává se tak jednou z mnoha technologií, které jsou využity v bezdrátových sítích páté generace 5G. Zároveň však s příchodem nových technologií přicházejí i nové výzvy a problémy k řešení. Rostoucí poptávka po bezdrátových technologiích přiměla vědce k hlubšímu zkoumání potenciálu komunikace prostřednictvím vln s milimetrovými vlnovými délkami a dala tak záminku ke vzniku sítí páté generace. Zároveň lze předpokládat, že milimetrové vlny budou tvořit základ i při vzniku nových bezdrátových sítí budoucích generací [17].

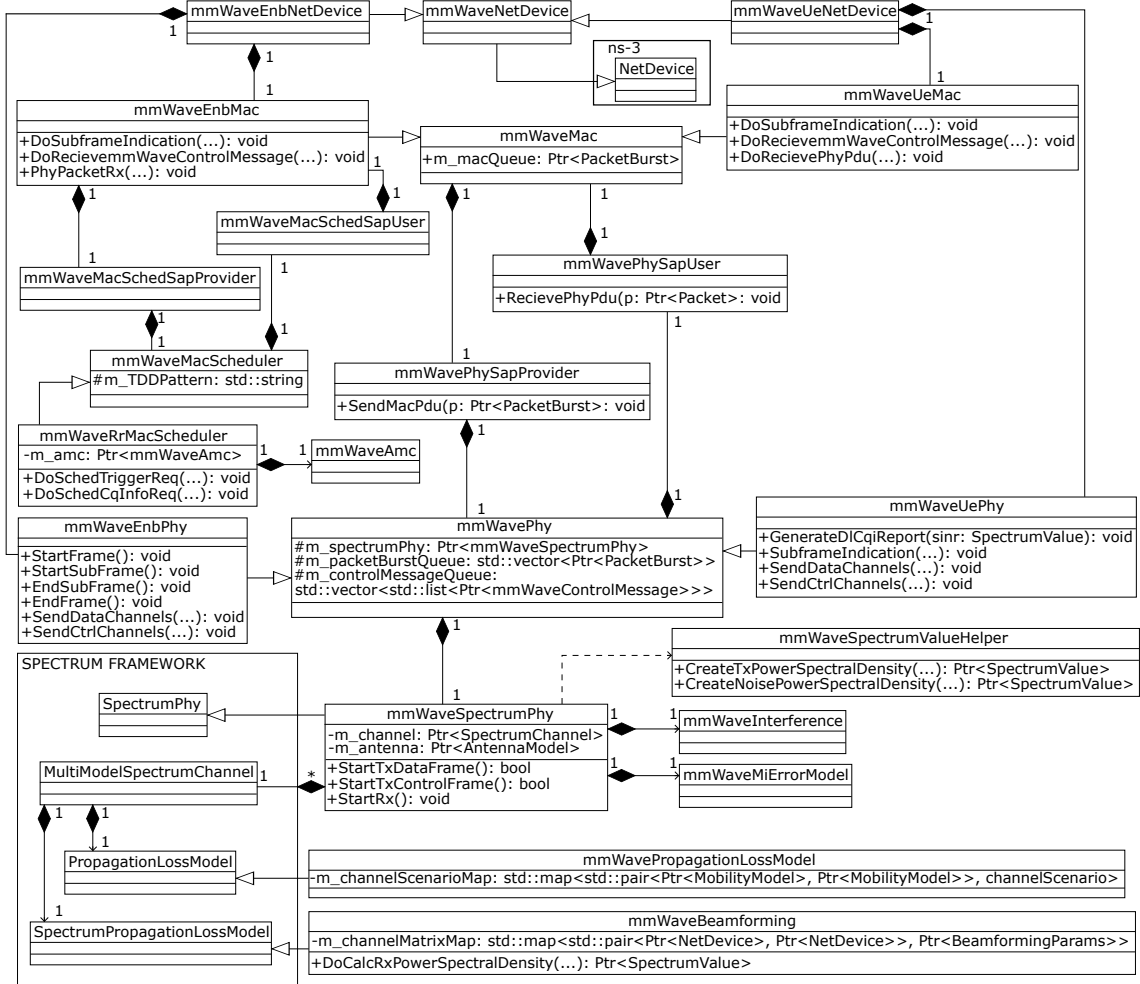
Přestože je s přenosem milimetrových vln spjat poměrně vysoký útlum, technologie na fyzické vrstvě v podobě například antén schopných adaptivního přizpůsobování jsou schopny tento útlum značně omezit, což dokazují měření provedená v reálném prostředí. Nicméně než bude možné tuto technologii efektivně využívat v praxi na globální úrovni, je třeba nejdříve vyřešit řadu problémů spojených s jejím nástupem. A to především na vrstvách nad fyzickou vrstvou i v samotném jádru sítě jako takové. Například velká citlivost milimetrových vln na náhlý vznik překážek bude pravděpodobně vyžadovat rychlejší handovery mezi sousedními buňkami. Také protokol TCP (komunikační protokol na transportní vrstvě – Transmission Control Protocol) se bude muset rapidněji přizpůsobovat častým změnám kanálů, aby nedocházelo k přetížení.

Simulace v diskrétním čase jsou již řadu let jedním z nejmocnějších nástrojů dostupných pro vývoj nových protokolů a simulování složitých sítí. Simulátor NS-3 v současné době poskytuje širokou škálu komunikačních protokolů využívaných v reálných prostředích. Vzhledem k výše uvedeným skutečnostem vznikl volně šiřitelný modul mmWave, který slouží k modelování propagace signálu na fyzické vrstvě [17].

4.2.1 mmWave framework

NS-3 modul mmWave je zaměřen především na simulování sítí buňkového typu LTE a je postaven na architektuře modulu LTE LENA. Posledním důležitým vylepšením modulu byla implementace servisních přístupových bodů, o kterých bude řeč

později v této práci. Jak již bylo řečeno, zdrojový kód modulu mmWave je psán v jazyce C++. Celý modul se skládá z propagačního a kanálového modelu, fyzické vrstvy a MAC (součást linkové vrstvy modelu ISO/OSI – Media Access Control) vrstvy. Na obrázku 4.1 je vidět UML (grafický jazyk – Unified Modeling Language) diagram nejdůležitějších tříd, kterými je modul tvořen. Jejich popis je uveden v následujících kapitolách této práce. Za zmínku stojí především třídy *MmWaveEnbNetDevice* a *MmWaveUeNetDevice*, které reprezentují eNodeB (eNB) základnovou stanici a User Equipment (UE) uživatelské zařízení, resp. přijímač. Další důležité MAC třídy *MmWaveEnbMac* a *MmWaveUeMac* implementují rozhraní uživatele a poskytovatele. Za zmínku také stojí třídy *MmWavePhy*, které obstarávají směrový přenos a příjem dat uplinku a downlinku [17].



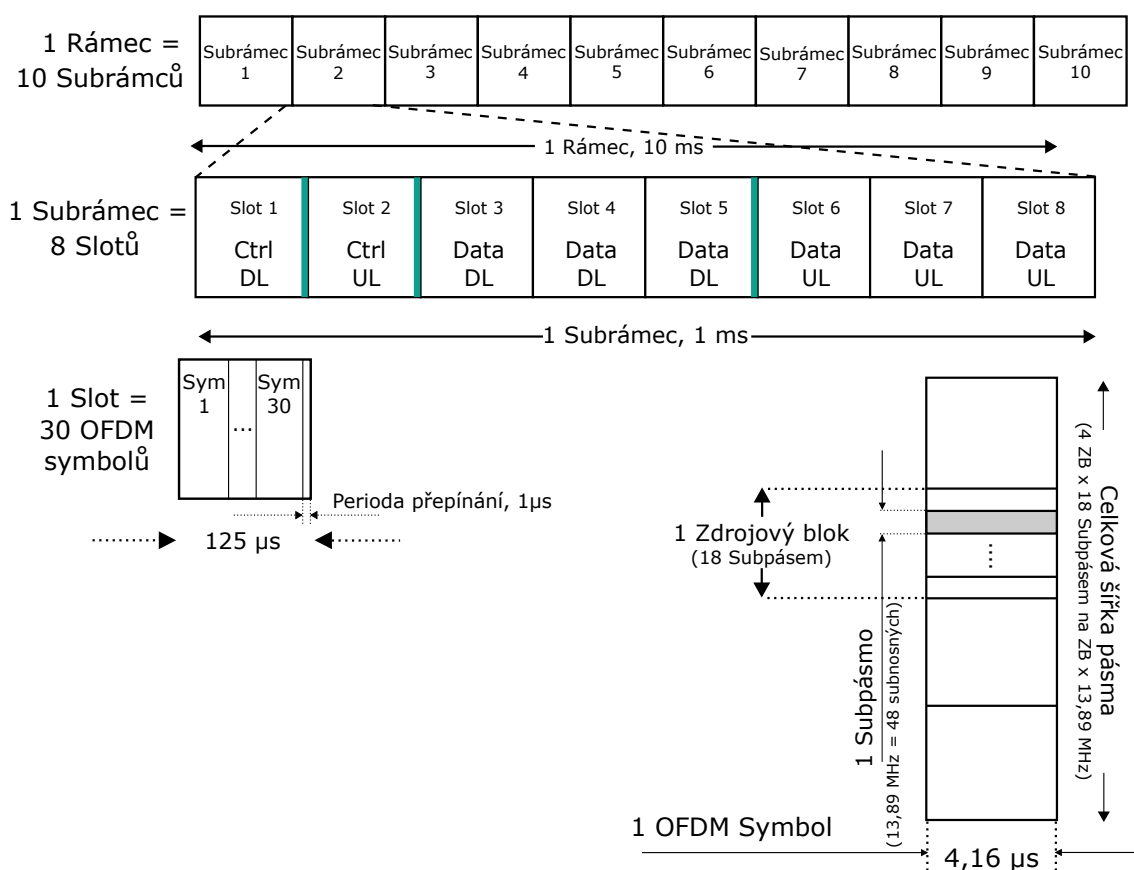
Obr. 4.1: Diagram tříd modulu mmWave [17].

Fyzická vrstva modelu

Mezi významné prvky fyzické vrstvy modulu mmWave patří:

- Plně modifikovatelný časový duplex (TDD).
- Podpora techniky MIMO (technika více-anténí komunikace – Multiple Input Multiple Output) spolu s rádiovou charakterizací, která umožňuje malé i velké změny rozsahu kanálu.
- Model pro dekódování chyb na straně přijímače.
- Model pro přeslechy.
- Smyčka pro adaptaci kanálu na základně zpětných korekcí.

Pro snížení zpoždění při přenosu informací vzduchem bude potřeba, aby modul mmWave využíval časový duplex. Z toho důvodu obsahuje NS-3 model s nastavitelným TDD. Každý rámeček je rozdělen do několika subrámečků, které mají pevnou délku určenou uživatelem. Každý tento subrámeček je dále rozdělen na několik slotů, které mají opět pevnou délku. Každý slot poté obsahuje specifický OFDM (ortogonální multiplex s frekvenčním dělením – Orthogonal Frequency Division Multiplexing) symbol. Slot může obsahovat buď řídicí informace, nebo data pro downlink či uplink [18].



Obr. 4.2: Struktura rámečku v modelu mmWave [18].

Na obrázku 4.2 lze vidět příklad struktury rámce TDD. Každý rámec délky 10 ms je rozdělen na 10 subrámců s délkou 1 ms. Každý subrámec je poté dále dělen na 8 slotů, kdy každý slot má délku $125 \mu s$. Jednotlivé sloty, v tomto případě, reprezentují 30 OFDM symbolů s délkou přibližně $4,16 \mu s$. První dva sloty jsou určeny k řízení downlinku, resp. uplinku. Třetí až pátý slot je určen pro přenos dat ve směru downlink a zbylé sloty (5 až 8) pro uplink. Pokaždé, když dojde ke změně směru přenosu (z uplinku na downlink, nebo opačně), je vložena tzv. přepínací mezera o velikosti $1 \mu s$. Co se frekvence týče, celé pásmo o šířce 2,16 GHz je rozděleno na 4 zdrojové bloky. Každý z těchto bloků je dále rozdělen na 18 subpásem se šířkou 30 MHz. Celkově tak vznikne 72 subpásem pro celou šířku pásma. Zároveň každé z těchto subpásem obsahuje 48 subnosných, což v tomto případě udává celkový počet zdrojových prvků N_{ZP} na jeden slot:

$$N_{ZP} = 30 \times (48 \times 72) = 103680. \quad (4.1)$$

Uživatel si strukturu rámců může libovolně zvolit sám. Veškeré hodnoty uživatelem zvolené jsou uloženy ve třídě *mmwavePhyMacCommon*. Příklad těchto parametrů lze najít v tabulce 4.1. Mezi nejdůležitější parametry modelu patří např. časový interval TTI (délka přenášeného slotu – Transmission Time Interval), který určuje délku jednoho slotu. Lze jej získat následovně:

$$TTI = SymbolyNaSlot \times DelkaSymbolu. \quad (4.2)$$

Ve zdrojovém kódu modelu je toto zajištěno funkcí *mmwavePhyMacCommon::GetTTI()*. Podobně jako TTI lze získat další parametry. Jedním z nich je šířka pásma jednoho zdrojového bloku. Získat ji můžeme takto:

$$B_{ZB} = SubpasmaNaZdrojovyBlok \times SirkaSubpasma. \quad (4.3)$$

Obdobně jako u TTI, je toto implementováno funkcí *mmwavePhyMacCommon::GetRBWidth()*. Celkovou šířku pásma lze získat:

$$B_{SP} = B_{ZB} \times PocetZdrojovychBloků. \quad (4.4)$$

Toto je implementováno funkcí *mmwavePhyMacCommon::GetSystemBandwidth()* [17].

Kritické pro komunikace prostřednictvím milimetrových vln je počítání se ziskem z více antén, nebo vícecestným šířením signálu. Model pro výpočet ztrátovosti můžeme rozdělit do tří stavů: LOS, NLOS (blok mezi vysílačem a přijímačem – Non Line of Sight) a výpadek. Model pokaždé následuje daný postup [18]:

1. Na základě vzdálenosti přijímače od vysílače je vypočtena pravděpodobnost existence každého z těchto stavů.

2. Je vybrána referenční hodnota mezi 0 a 1 a je porovnána s pravděpodobností každého stavu.
3. Pokud je referenční hodnota nižší než hodnota pravděpodobnosti stavu LOS, je vybrán stav LOS. Pokud je referenční hodnota větší než pravděpodobnost stavu LOS a zároveň je menší než pravděpodobnost stavu NLOS, je vybrán stav NLOS. Jinak je vždy vybrán výpadek.

Kvůli vysokým ztrátám při přenosu je vhodné využít více antén s funkcí směřování paprsků, aby byla zajištěna akceptovatelná kvalita spojení. Pro zajištění spolehlivého spojení, je nutnou součástí modulu mechanismus zpětné vazby [18]. Pro účely této práce je zpětná vazba generována funkcí *mmWaveUePhy*.

Tab. 4.1: Parametry ke konfiguraci struktury rámce [17].

Název parametru	Výchozí hodnota	Popis
SymbolPerSlot	30	Počet OFDM symbolů na slot
SymbolLength	4.16	Délka jednoho OFDM symbolu v μs
SlotsPerSubframe	8	Počet slotů v jednom subrámcí
SubframePerFrame	10	Počet subrámců v jednom rámci
NumReferenceSymbols	6	Počet referencí OFDM symbolů na slot
TDDControlDataPattern	"ccddddd"	Řídící (c) a datový (d) vzor
SubcarriersPerSubband	48	Počet subnosných na subpásmo
SubbandsPerRB	18	Počet subpásem na zdrojový blok
SubbandWidth	13,89	Šířka subpásmo v MHz
NumResourceBlock	4	Počet zdrojových bloků na slot
CenterFreq	28	Frekvence nosné v GHz

Vrstva MAC

Vrstva MAC ve frameworku je tvořena třídou *mmWaveMac*, která je základní třídou pro funkci *mmWaveEnbMac* pro určení parametrů vysílače a funkci *mmWaveEnbMac* pro určení parametrů přijímače. Hlavní funkcí této vrstvy je doručování datových paketů přicházejících z vrstev vyšších na vrstvu fyzickou a naopak.

Na základě výměny informací mezi přijímačem a vysílačem pomocí řídicích zpráv *mmWaveCqiReport* je vypočtena nejvhodnější modulace a kódovací schéma pro komunikaci mezi oběma uzly. Tomuto procesu se říká adaptivní modulace a kódování a je implementován časovačem na straně vysílače. Během této výměny informací je vygenerováno modulační a kódové schéma zároveň s velikostí transportního bloku, který může být přenášen fyzickou vrstvou. Velikost transportního bloku je vypočtena na základě celkového počtu subnosných na zdrojový blok, získaného z parametrů zadaných uživatelem, dále pak počtem symbolů na slot a počtem referenčních symbolů

na slot. Je zde použit kód pro cyklickou redundanci o délce 24 bitů [18].

O tom, jak bude vypadat schéma časového duplexu, vynuceného časovačem, rozhoduje uživatel modifikací parametru „*TDDControlDataPattern*“ viz tabulka 4.1. Datové sloty jsou rovnoměrně rozloženy mezi downlink a uplink sloty s tím, že první polovina datových slotů je alokována pro downlink a zbytek pro uplink. Sloty určené k řízení jsou přiřazeny k řídicímu kanálu pro downlink, resp. pro uplink. Toto schéma minimalizuje čas přepínání mezi uplinkem a downlinkem při přenosu dat.

Rozdělení zdrojů ve frekvenční hladině může být upraveno pomocí parametru *mmWavePhyMacCommon*, jak je uvedeno v tabulce 4.1. Časovač vrstvy MAC využívá jednoduchý round robin algoritmus pro alokaci datových slotů uplinku a downlinku. Veškeré frekvenční prvky v daném slotu jsou přiřazeny stejnému uživateli. Pomocí řídicích slotů může každý uživatel komunikovat s řídicí stanicí [19].

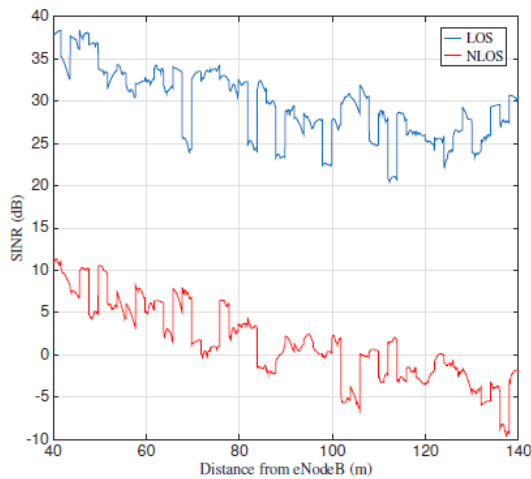
Servisní přístupový bod

Servisní přístupový bod je rozhraní mezi fyzickou a MAC vrstvou nebo mezi MAC vrstvou a časovačem MAC vrstvy. Komunikace mezi MAC a fyzickou vrstvou pomocí servisního AP (přístupový bod – Acces Point) probíhá následovně [17]:

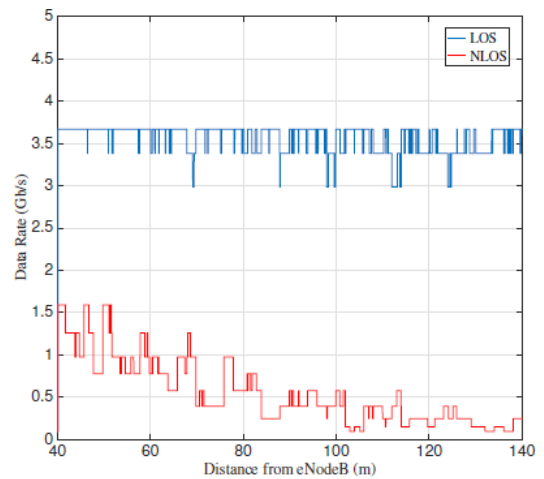
1. Indikace subrámcce je poslána fyzickou vrstvou k vrstvě MAC na začátku každého slotu. Indikace prvního slotu pro daný subrámec spustí časovací proceduru pro MAC vrstvu vysílače. Následné indikace jsou nezbytné pro správné doručení dat na vyšších vrstvách.
2. Vysílač zajišťuje fronty dat pro každého připojeného uživatele a současně pouze jedna taková fronta je dostačující pro jedno uživatelské zařízení. Na základě časovacího schématu a uložených zdrojů je fyzické vrstvě vyslán vrstvou MAC požadovaný počet paketů pro přenos.
3. Časovací a zdrojové informace přijaty vysílačem na MAC vrstvě jsou přeneseny fyzické vrstvě za použití zprávy *mmWaveResourceAllocation*. Fyzická vrstva poté vysílá tuto zprávu na všechny připojené uživatele upozorňujíc tak všechna zařízení v časovacím plánu.
4. Na základě parametru SINR (poměr signálu ku šumu a rušení – Signal to Interference plus Noise Ratio) přijatých datových slotů fyzická vrstva na straně příjemce vypočítá CQI (indikátor kvality kanálu – Channel Quality Indicator) a přeneše jej k základnové stanici v následujícím řídicím slotu. Na straně vysílače fyzická vrstva přijme řídicí zprávu *mmWaveCqiReport* a přepoše ji vrstvě MAC.

4.2.2 Výsledky simulací frameworku mmWave

Výsledky simulací pomocí modulu mmWave byly ověřeny samotnými tvůrci, využitím jednoduchých scénářů, kde byl uvažován jeden vysílač a jeden přijímač. Uživatel byl ve vzdálenosti 40 m od základnové stanice a pohyboval se k hranici buňky konstantní rychlostí 20 m/s. Nastavení parametrů simulace odpovídá hodnotám v tabulce 4.1. Vysílač v této simulaci měl vysílací výkon 30 dBm (1W). Simulace byly provedeny dvakrát pro zjištění odchylek mezi scénáři NLOS a LOS [17]. Výsledky simulací, provedených tvůrci modulu z NYU, lze pozorovat na obrázcích 4.3 a 4.4.



Obr. 4.3: Průměrná hodnota SINR odhadnuta uživateli [17].



Obr. 4.4: Přenosová rychlost uživatelů ve scénáři LoS a NLoS [17].

5 ZÍSKANÉ VÝSLEDKY

Předmětem praktické části této práce bylo provedení simulací přenosu dat v simulátoru NS-3, s využitím upraveného mmWave modulu zvaného NYUSIM, vytvořeného na New York University (NYU). Modul je primárně určen k simulování buňkových sítí typu LTE, umožňuje využít frekvenční rozsah 6 až 100 GHz a definuje čtyři různé scénáře simulací:

- Urban Microcell – uvažuje ulici obklopenou budovami a základnovou stanicí umístěnou pod úrovní střechy.
- Urban Macrocell – v tomto případě je základnová stanice umístěna nad úrovní střechy.
- Rural Macrocell – tento scénář je zaměřený na simulování propagace mimo zastavěné oblasti, resp. málo obydlené oblasti.
- Indoor Office – slouží k simulování reálného prostředí uvnitř budovy s tím, že základnová stanice je umístěna pod úrovní stropu [20].

Jelikož tématem této práce je modelování propagace signálu uvnitř budov, byl vybrán scénář Indoor Office, který poskytuje nejpřesnější výsledky pro účely této práce. Zároveň s tím byla zvolena hodnota frekvence simulovaného signálu 60 GHz. Simulace uvažuje jeden vysílač a jeden přijímač. Vysílač je pevně umístěn v bodě o souřadnicích $[0, 0]$ ve výšce 1,5 m nad podlahou. Přijímač je rovněž umístěn ve výšce 1,5 m a jeho souřadnice x se během simulace mění. Simuluje se tak reálný pohyb uživatele se stanicí. Přehled použitých parametrů při simulaci lze pozorovat v tabulce 5.1.

Tab. 5.1: Parametry simulace.

Parametr	Hodnota
Scénář	Indoor Office
Frekvence	60 GHz
Vysílací výkon	16 dBm
Výška antén	1,5 m
Počáteční vzdálenost	1,5 m
Koncová vzdálenost	20 m

Předmětem simulace byly celkem tři scénáře:

1. Simulace na fyzické vrstvě.
2. Simulace s využitím protokolu TCP.
3. Simulace s využitím protokolu UDP.

5.1 Popis použitého modelu

Pro účely této práce byl simulátor spuštěn ve virtuálním počítači s operačním systémem Ubuntu 16.04 verze 64-bit za použití virtualizačního nástroje VMware Workstation 12. Hostující počítač tvořil notebook Lenovo Z580, s procesorem Intel i5 2.50GHz, 8GB RAM, Windows 10 64-bit.

Skutečnost, že simulátor byl spuštěn ve virtuálním stroji a hostující počítač nepatří v dnešní době mezi výkonná výpočetní zařízení, se zásadně promítla na výpočetní dobu simulátoru. Čas výpočtu jednotlivých scénářů dosahoval v některých případech až desítek minut a vzhledem k tomu, že pro každý scénář bylo potřeba provést simulaci s téměř čtyřiceti kroky, trvalo získávání dosažených výsledků několik dní.

Virtuální stroj pro účely simulací obsahoval nástroj Eclipse neon.2 pro úpravu zdrojového kódu modulu. Dále pak složky se samotným modulem mmWave a nástroje pro správu souborů. Jinak se jednalo o standardní distribuci Ubuntu se základním programovým vybavením.

Pro získání požadovaných výsledků byly klíčové zejména tyto soubory:

- *mmwave-tcp.cc*
- *mmwave-udp.cc*
- *mmwave-fymac.cc*
- *mmWaveAttributesList.txt*

Soubor *mmwave-tcp.cc* obsahuje zdrojový kód, sloužící k nastavení parametrů a provedení samotné simulace scénáře pro protokol TCP. Obdobně soubory *mmwave-udp.cc* a *mmwave-fymac* obsahují kód pro scénáře pro simulaci datového provozu na protokolu UDP, resp. na fyzické vrstvě. Všechny tyto soubory obsahují značné množství proměnných a konstant, které ovlivňují průběh a výsledek simulací. Mezi nejvýznamnější parametry, které mají tyto scénáře společné, patří:

```
Config::SetDefault("ns3::MmWaveUePhy::TxPower",  
    DoubleValue(16));  
Config::SetDefault("ns3::MmWaveEnbPhy::TxPower",  
    DoubleValue(16));
```

pro nastavení výkonu antén a dále pak

```
double stopTime = 2;  
//Délka trvání simulace v sekundách.  
Config::SetDefault("ns3::MmWave3gppPropagationLossModel::  
    Frequency", DoubleValue(60e9));  
//Nastavení požadované frekvence, v našem případě 60e9 =  
    60GHz.
```



```

Config::SetDefault ("ns3::MmWave3gppPropagationLossModel
    ::Scenario", StringValue("InH-OfficeOpen"));
//Volba scénáře Indoor Office.
mmwaveHelper->SetAttribute ("PathlossModel", StringValue
    ("ns3::MmWave3gppPropagationLossModel"));
//Volba modelu propagace.
mmwaveHelper->SetAttribute ("ChannelModel", StringValue (
    "ns3::MmWave3gppChannel"));
//Volba modelu kanálu.
enbPositionAlloc->Add (Vector (0.0, 0.0, 1.5));
//Nastavení pozice vysílače v osách x, y, z.
uePositionAlloc->Add (Vector (19.5, 0.0, 1.5));
//Nastavení pozice přijímače v osách x, y, z.

```

Soubor *mmWaveAttributes.txt* obsahuje seznam modelů, které lze pro simulace využít. Pro každý scénář lze vybrat z řady poskytnutých modelů a je tak možné provést simulaci podle daných teoretických předpokladů. Všechny tyto soubory jsou přiloženy v příloze této práce.

Pro získání požadovaných výsledků bylo potřeba upravovat primárně pozici přijímače, tedy parametr *uePositionAlloc*, kde se měnila vzdálenost od vysílače, tedy osa *X* a to v hodnotách od 1,5 m do 20 m s krokem 0,5 m. Pro vzdálenosti menší než 1,5 m a větší než 20 m již simulátor nepracuje zcela korektně, proto se tyto hodnoty v práci neuvažují. U scénáře simulujícího provoz protokolu UDP bylo kromě vzdálenosti vysílače od přijímače nutné měnit i parametr *packet intervals*, který určuje, v jakých intervalech pakety proudí. Zároveň bylo třeba ručně nastavovat hodnotu kódovacího schématu (MCS) pro vybraný model. V případě scénářů pro TCP a fyzickou vrstvu byly tyto parametry nastaveny automaticky. Při simulování provozu na fyzické vrstvě bylo potřeba zvýšit vysílací výkon antén parametry *ns3::MmWaveUePhy::TxPower* a *ns3::MmWaveEnbPhy::TxPower* na hodnotu 23 dB z důvodu nedostatečného výkonu a tedy nevyhovujících výsledků.

Hodnoty získané simulacemi byly ukládány do souboru *RxPacketTrace.txt*, jehož struktura odpovídá tabulce 5.2.

První sloupec značí směr přenosu dat, tedy buď uplink nebo downlink. Ve druhém sloupci je číslo přenášeného rámce, následované počtem subrámců. Třetí sloupec obsahuje označení prvního symbolu rámce a další sloupec udává celkový počet symbolů. Další sloupce obsahují číslo buňky, velikost přenesených dat v bitech, kódovací schéma, získanou hodnotu SINR.

Tab. 5.2: Příklad získaných hodnot ze souboru *RxPacketTrace.txt* (pouze první 4 řádky).

	frame	subF	1stSym	symbol#	cellId	tbSize	mcs	rv	SINR (dB)
DL	16	6	1	22	1	1131	0	0	45.4994
DL	16	7	1	11	1	567	0	0	45.5001
UL	16	7	12	11	1	567	0	0	45.7706
DL	16	8	1	11	1	567	0	0	45.5007

Z takto získaných výsledků byly zejména důležité hodnoty SINR, počet rámců a množství přenesených dat. Přenosová rychlost scénáře je poté dána vztahem

$$T = \frac{tbSize \cdot 8}{t_f}, \quad (5.1)$$

kde $tbSize$ je velikost přenesených dat jedním rámcem (viz tabulka 5.2) a t_f je doba přenosu jednoho rámce a získá se jako

$$t_f = \frac{t_s}{N_f}, \quad (5.2)$$

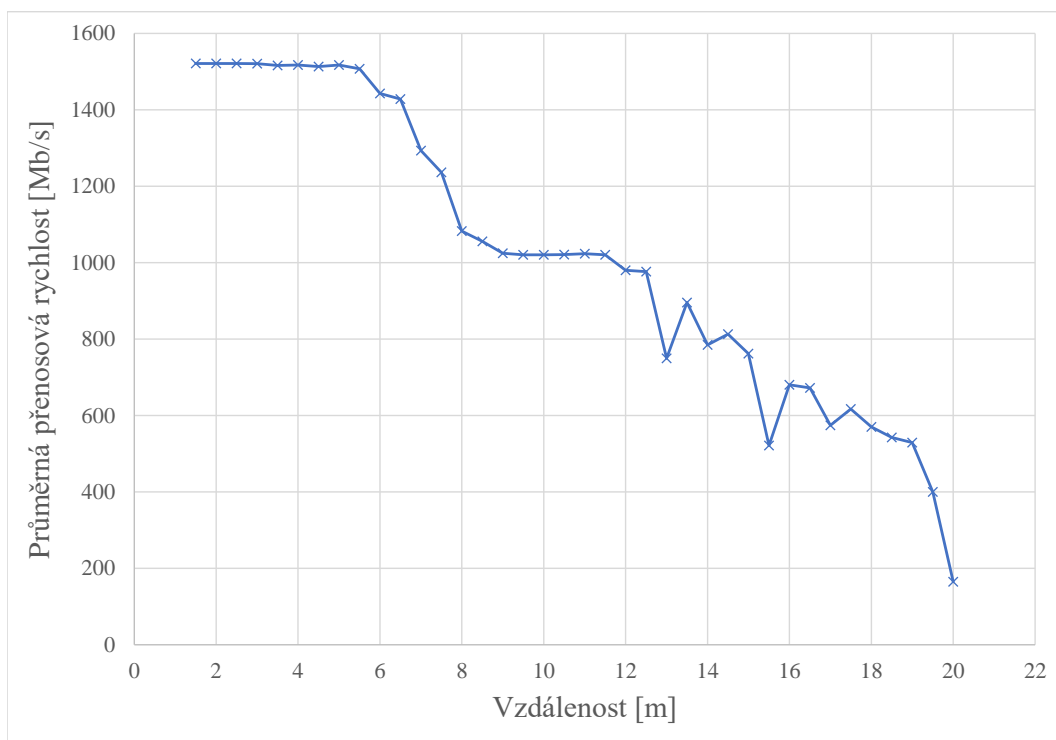
kde t_s označuje dobu simulace a N_f celkový počet přenesených rámců. Výsledná hodnota T poté značí propustnost v jednotkách gigabit za sekundu - Gigabite per second (Gbps). Po získání hodnoty přenosové rychlosti pro všechny rámce daného scénáře byla vypočtena průměrná přenosová rychlost pro celý scénář a následně byla tato hodnota zanesena do grafu pro lepší znázornění. Výsledné grafy pro všechny tři scénáře následují v závěru této práce.

Jelikož hodnoty SINR byly již vypočteny simulátorem, nebylo třeba je dále zpracovávat a byla opět pouze určena průměrná hodnota pro daný scénář, která byla rovněž zanesena do samostatného grafu.

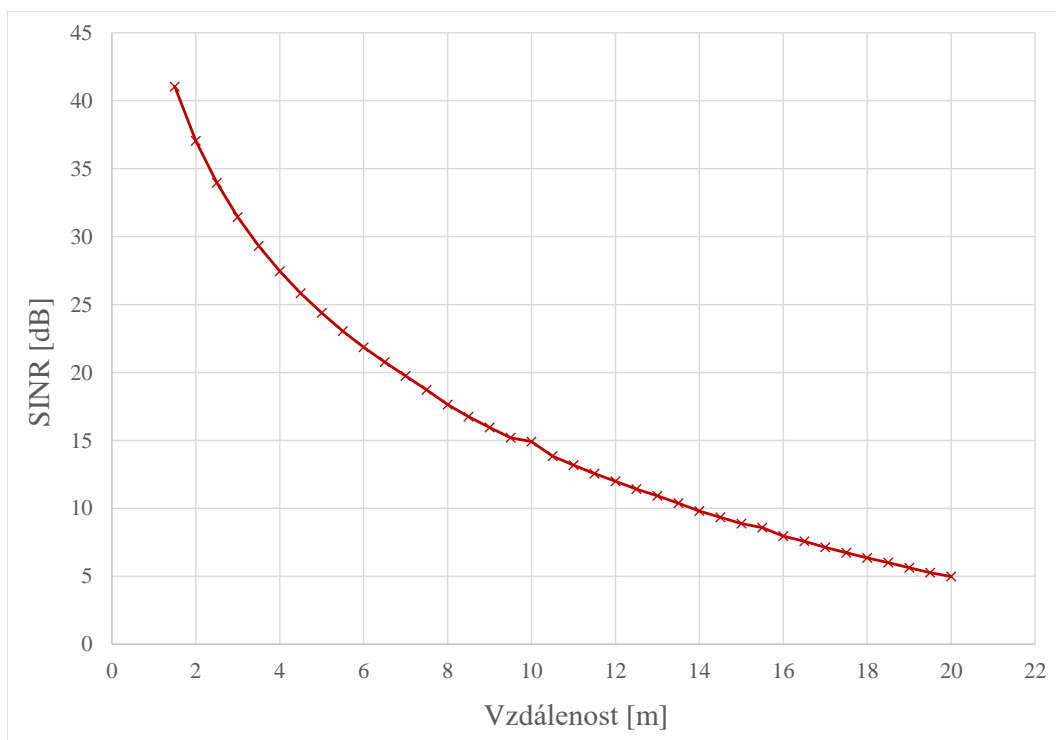
5.2 Získané výsledky

Výsledky provedených simulací, na již zmíněných scénářích, lze pozorovat na obrázcích 5.1 až 5.6, které zachycují grafy získaných hodnot.

Graf 5.1 znázorňuje závislost propustnosti protokolu TCP na vzdálenosti. Z grafu je patrné, že s rostoucí vzdáleností přijímače od vysílače se propustnost snižuje. Do vzdálenosti cca 5 m od vysílače vykazuje přijímač přibližně stejnou hodnotu propustnosti, navzdory měnící se vzdálenosti a klesající hodnotě SINR, kterou lze pozorovat v grafu 5.2. Závislost začíná být zřejmá až od hodnoty přibližně 6 m. Tato skutečnost je způsobena chováním samotného modulu a není možné tyto výsledky nijak změnit.



Obr. 5.1: Průměrná přenosová rychlost protokolu TCP.

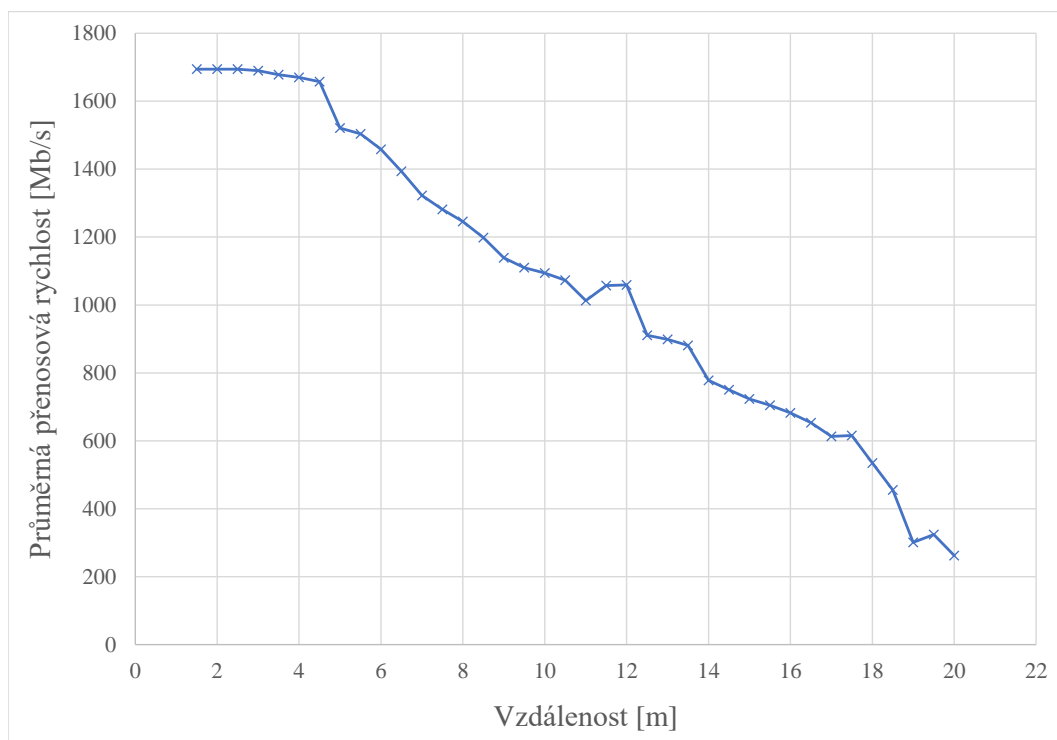


Obr. 5.2: Průměrná hodnota SINR protokolu TCP.

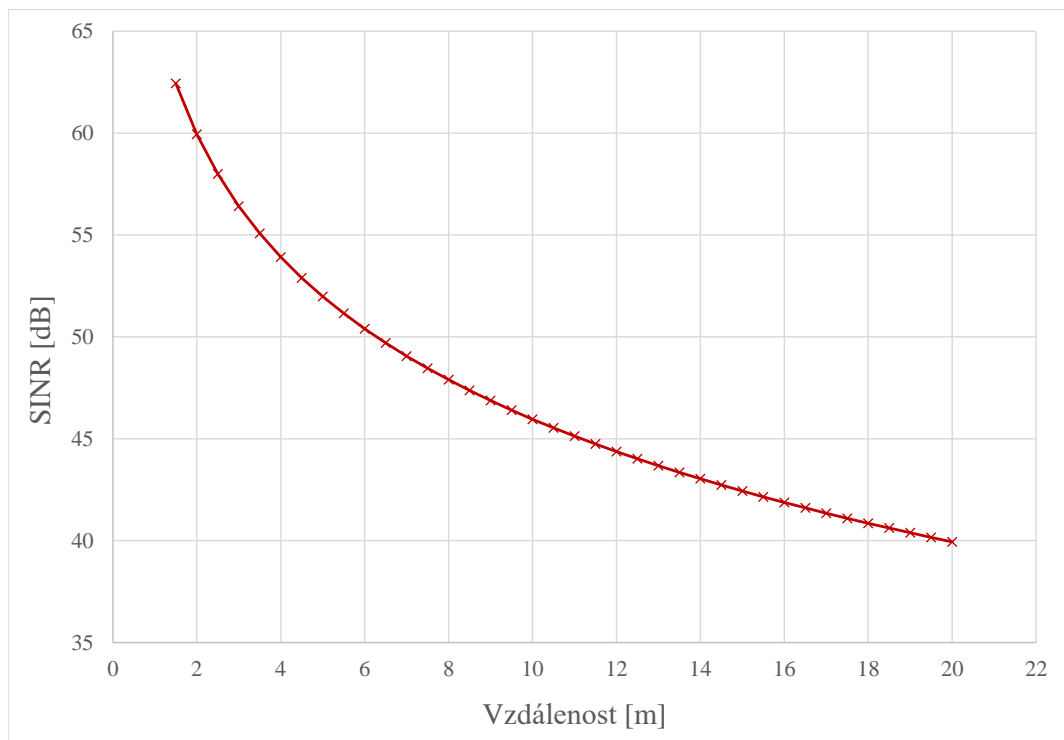
S nedokonalostí modulu rovněž souvisí skokové změny hodnot propustnosti ve vzdálenostech 13 m a 15.5 m, kde tyto hodnoty, navzdory teoretickým předpokladům, zcela patrně vystupují z řady.

Na obrázku 5.2 lze pozorovat závislost hodnoty SINR na vzdálenosti vysílače od přijímače. Z grafu je patrné, že SINR s rostoucí vzdáleností klesá a nejmenší hodnoty (přibližně 5 dB) dosahuje při maximální vzdálenosti, tedy 20 m. Klesání hodnot je plynulé a odpovídá teoretickým předpokladům.

Na rozdíl od TCP vykazuje scénář protokolu UDP navýšení průměrné přenosové rychlosti ve všech bodech simulace a to přibližně o 200 Mbps. Z grafu 5.3 je patrné, že průběh výsledných hodnot je obdobný, ale klesání je spíše lineárního charakteru a výsledná křivka neobsahuje příliš velké výkyvy hodnot. Stejně jako u scénáře TCP, platí i tady, že prvních přibližně pět metrů se hodnota přenosové rychlosti téměř nemění.



Obr. 5.3: Průměrná přenosová rychlost protokolu UDP.

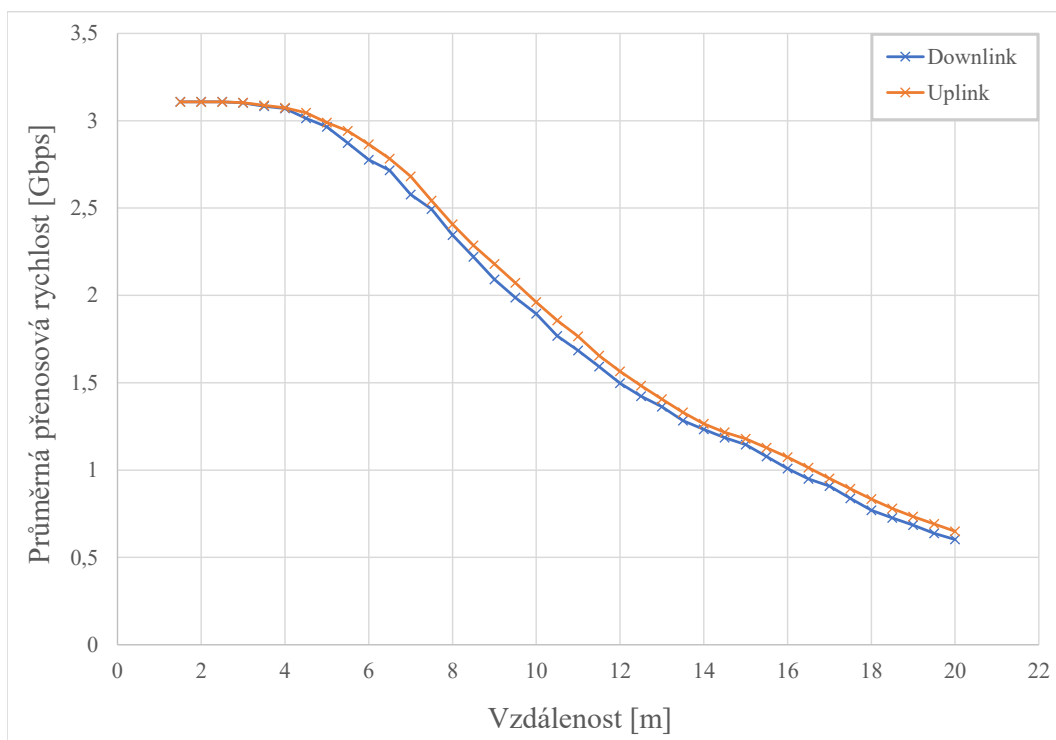


Obr. 5.4: Průměrná hodnota SINR protokolu UDP.

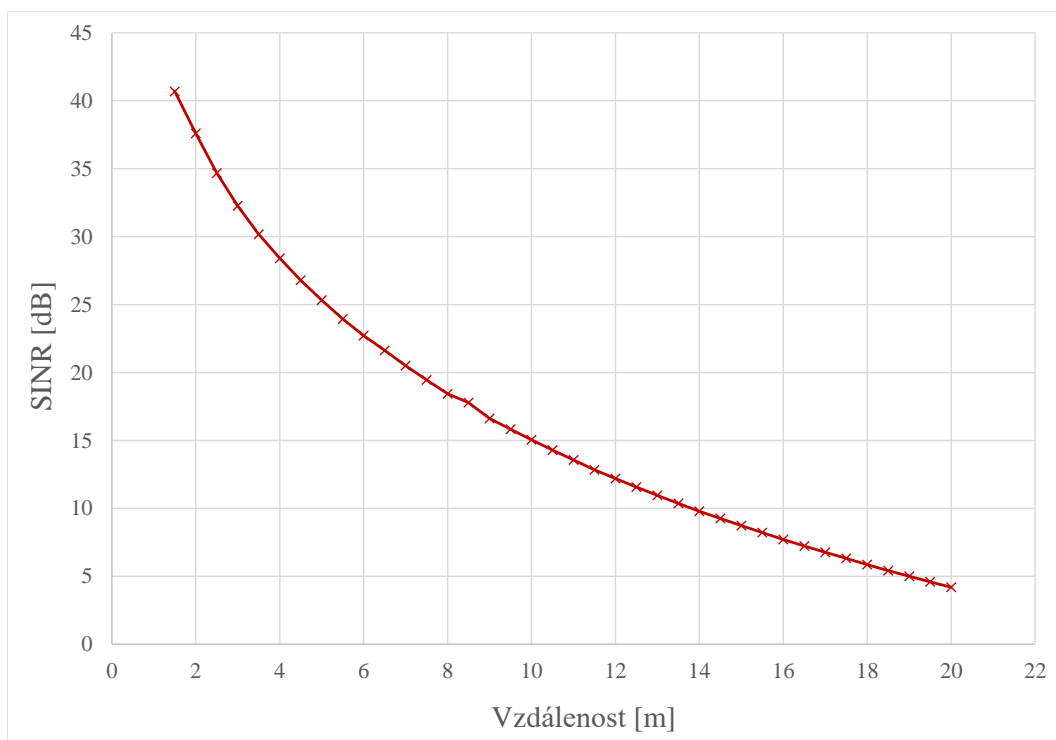
Výsledný graf hodnot SINR u scénáře protokolu UDP ukazuje, že průběh hodnot je opět téměř shodný, ale samotné hodnoty se zásadně liší. Oproti scénáři s TCP je zde nárůst přibližně 20 dB u všech bodů simulace. Nejvyšší bod grafu nabývá hodnoty přibližně 61 dB, nejnižší pak 38,5 dB. Přesný průběh lze pozorovat na obrázku 5.4

Při simulování provozu na fyzické vrstvě byly zjištěny, oproti scénářům s protokoly TCP a UDP, zcela odlišné hodnoty přenosových rychlostí. Z grafu 5.5 je patrné, že naměřené rychlosti jsou téměř dvojnásobně vyšší, než tomu bylo u předchozích dvou scénářů. V grafu je pro lepší názornost oddělen směr provozu na uplink a downlink. Opět lze pozorovat stagnaci rychlosti na prvních několika metrech a následující pokles lineárního charakteru.

Průběh hodnot SINR u scénáře simulování provozu na fyzické vrstvě, na obrázku 5.6, je velmi podobný scénáři TCP a to i včetně samotných hodnot.



Obr. 5.5: Průměrná přenosová rychlost na fyzické vrstvě.



Obr. 5.6: Průměrná hodnota SINR na fyzické vrstvě.

Je-li pomínuta skutečnost, že modul ne vždy podal zcela korektní výsledky, a porovnáme výsledné hodnoty s grafy hodnot získaných z měření v reálném prostředí, zjistíme, že jsou si velmi podobné. Lze tedy předpokládat, že simulace mohou poskytnout užitečná data, která odpovídají reálným výsledkům, které jsou popsány v následující kapitole práce.

5.3 Porovnání s výsledky reálného měření

Jak již bylo řečeno dříve v této práci, výsledky získané v simulaci je možné porovnat s výsledky získanými z reálného měření. Toto měření probíhalo na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií paralelně s touto prací. Měření probíhalo v prostorách UTKO, konkrétně v 5.NP budovy E komplexu Technická 12 v Brně, tedy v prostorách, které byly předlohou pro tvorbu 3D modelu pro tuto práci.

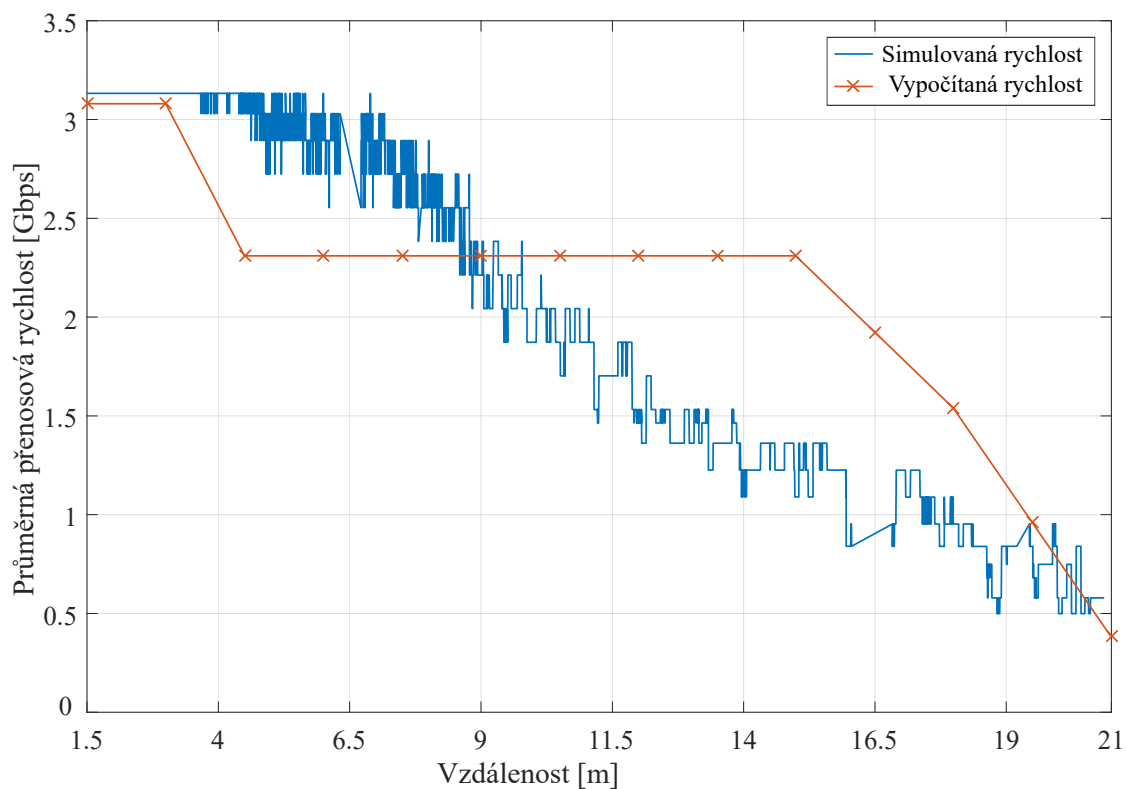
Měření probíhalo na principu klient-server, kde server tvořil základnovou stanici a skládal se ze stolního počítače s modulem Dell DW1601 připojeným do slotu Mini PCI Express. Tento modul podporuje WiFi (IEEE 802.11) i WiGig (IEEE 802.11ad) pracující na frekvenci 60 GHz. Na straně klienta, tedy přijímače, se nacházel notebook s bezdrátovou dokovací stanicí Dell D5000. Notebook byl ke stanici připojen ethernetovým kabelem kategorie 6, aby bylo možné dosažení přenosové rychlosti až 1 Gbps [20].

Pro potřeby měření při takto vysokých přenosových rychlostech by běžný počítač pravděpodobně nestačil data zpracovávat, proto byl pro účely měření použit výkonný laboratorní stroj. Parametry obou zařízení jsou k nalezení v tabulce 5.3.

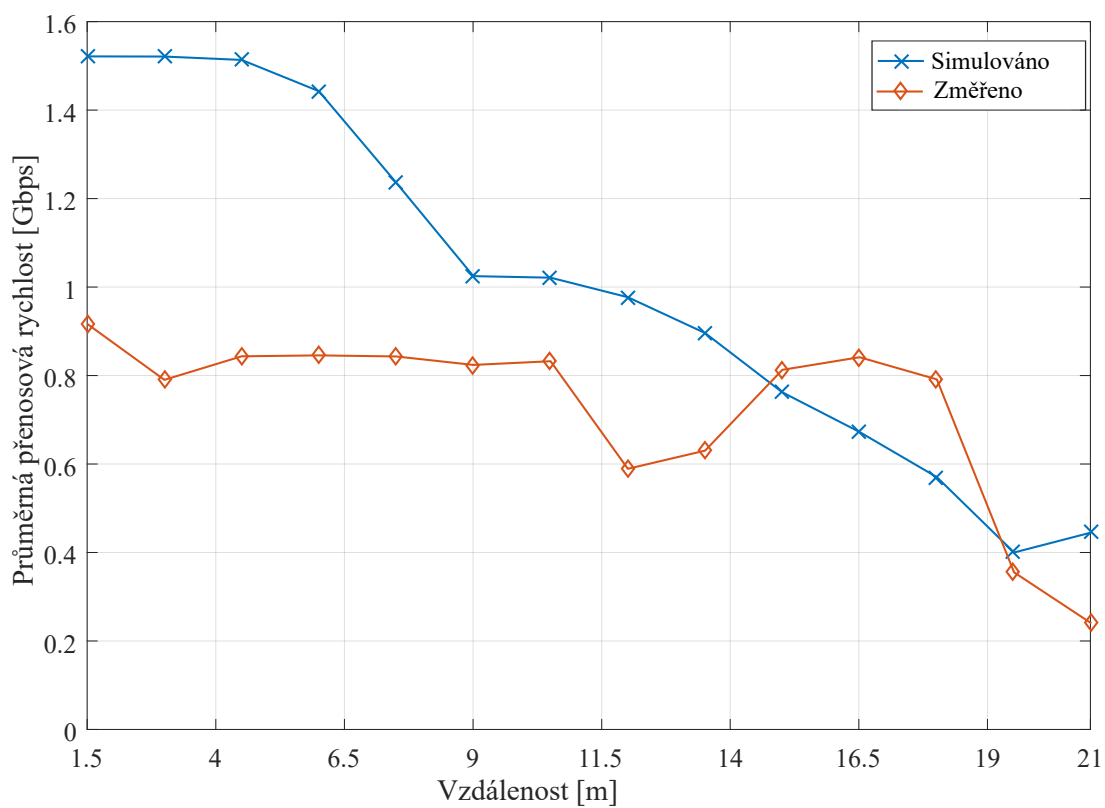
Tab. 5.3: Parametry použitého vybavení [20].

	Základnová stanice	Uživatelská stanice
Operační systém	Windows 10 64-bit	Windows 10 64-bit
Základní deska	Gigabyte B150M-D3G-CF	P65_P67RGRERA
Procesor	Intel Core i5 6500, 3.2 GHz	Intel Core i7 6700HQ, 2.6 GHz
RAM	16 GB	32 GB
WiGig modul	DELL DW1601	Wilocity WIL6110

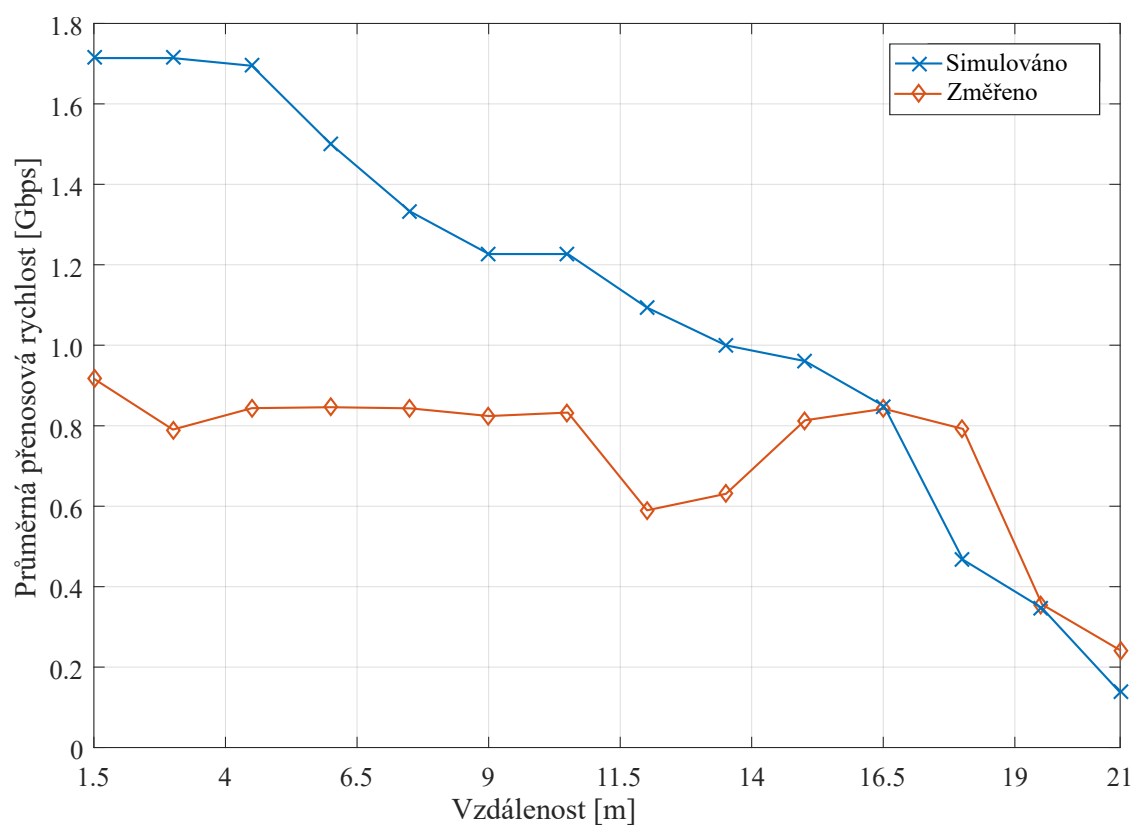
Obrázky 5.7 až 5.9 ukazují výsledky provedených simulací a následně měření v reálném prostředí.



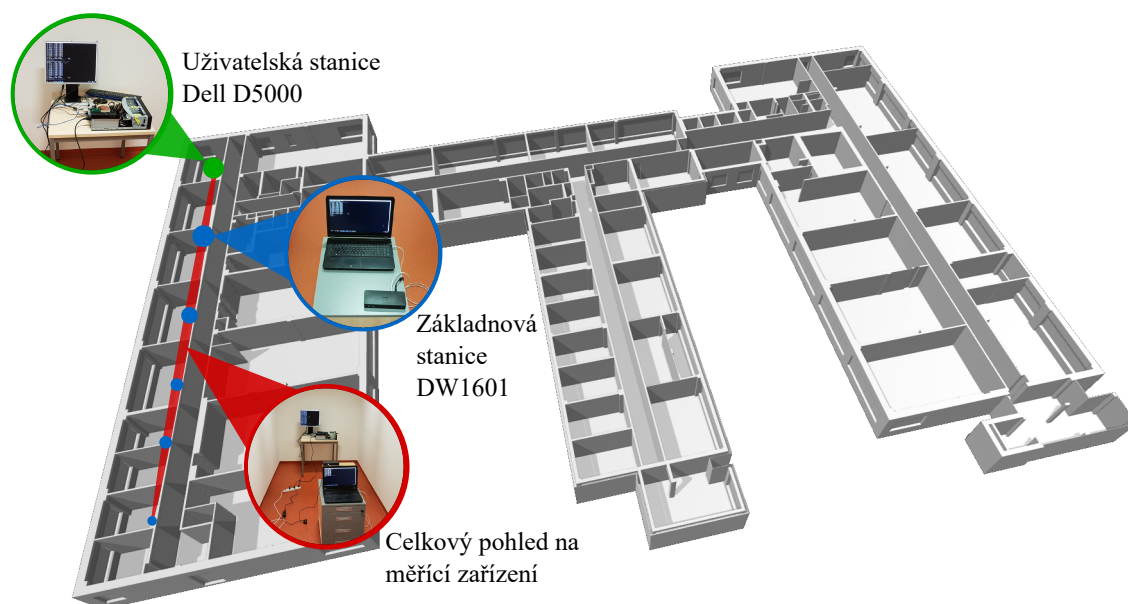
Obr. 5.7: Průměrná přenosová rychlost na fyzické vrstvě. [20]



Obr. 5.8: Průměrná přenosová rychlost protokolu TCP [20].



Obr. 5.9: Průměrná přenosová rychlost protokolu UDP [20].



Obr. 5.10: Zařízení použitá při měření v budově FEKT [20].

Na obrázku 5.10 lze vidět použitá zařízení i oblast, kde měření probíhalo.

Závěrem lze říci, že výsledky provedených simulací souhlasí s výsledky získanými měřeními a to i přesto, že simulační model vykazuje nepřesnosti. To bylo zejména způsobeno tím, že tento model nebyl primárně navržen pro simulování scénáře point-to-point s jedním vysílačem a jedním přijímačem, popř. s jedním vysílačem a více přijímači, ale spíše pro simulování buňkového rozložení systému LTE. Navzdory této nepřesnosti model odpovídá měření v reálném prostředí. Autoři modelu již pracují na novém modelu pro simulování scénářů s použitím technologie WiFi, který by měl přinést ještě realističtější výsledky.

6 ZÁVĚR

Tato práce vznikla za účelem teoretického rozboru a následně praktické implementace možností modelování propagace signálů bezdrátových sítí a to především uvnitř budov.

Úvodní část diplomové práce je věnována teorii šíření elektromagnetických vln ve volném prostoru i uvnitř budov. Jsou zde popsány základní principy šíření vlnění a jevy, které se při něm vyskytují. Tato část rovněž obsahuje popis metod, jimiž je možné šíření elektromagnetických vln předem odhadnout na základě výpočtů. Zejména jsou zde popsány metody ray-launching a ray-tracing. Závěr části nastiňuje rozdíly šíření vlnění s různými frekvencemi a to především v rozsahu od 2 do 60 GHz, zejména však je zde popsána technologie WiFi s frekvencí 5 GHz a standard WiGig, pracující ve frekvenčním pásmu 60 GHz.

Druhá část práce popisuje průběh vytváření 3D modelu prostor UTKO. Je zde k nalezení odůvodnění zvoleného software, popis průběhu práce na modelu i projekce samotného modelu pátého nadpodlaží prostor UTKO.

Následující část práce obsahuje popis algoritmu, jenž byl použit pro praktický výpočet propagace signálu 5 GHz WiFi v již zmíněných prostorách. Jsou zde rovněž uvedeny vzorce, které byly k výpočtu využity a výsledky, které byly výpočty a následnou simulací získány, včetně grafického zpracování.

Čtvrtá část práce obsahuje popis simulátoru Network Simulator (NS-3) a především jednoho z dostupných modulů - mmWave. Tento modul byl následně využit pro simulování šíření signálu pro standard IEEE 802.11ad, tj. WiGig. Tato část obsahuje detailní popis modulu, včetně jeho částí a v závěru také výsledky simulací, které byly provedeny tvůrci modulu.

Závěr práce je věnován výsledkům, které byly během této práce získány. Jedná se především o popis zdrojového kódu modulu a použitých parametrů. Dále tato část obsahuje samotné výsledky získané z provedených simulací. Tyto výsledky byly pro lepší přehled zaneseny do grafů. V závěru této části se nachází porovnání výsledků získaných ze simulací s výsledky měření, která probíhala v reálném prostředí prostor UTKO.

LITERATURA

- [1] SLANINA, M. *Moderní bezdrátová komunikace: přednášky*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Ústav radioelektroniky, 2010. ISBN 978-80-214-4156-9.
- [2] MAZÁNEK, M., J. VOKURKA a P. PECHAČ. *Antény a šíření vln*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-01-01855-5.
- [3] HEODORE, S. RAPPAPORT. *Wireless communications: principles. & practice*. N.Y. : I.E.E.E. Press: IEEE Press, 1996. ISBN 0-7803-1167-1.
- [4] TRACY, E. R. *Ray tracing and beyond: phase space methods in plasma wave theory*. Vyd. 1. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. ISBN 978-0-521-76806-1.
- [5] LAI, Z., G. DE LA ROCHE, N. BESSIS, G. CLAPWORTHY, D. ZHOU a J. ZHANG. *Intelligent Ray Launching Algorithm for Indoor Scenarios*. Radioeng [online]. 2011, 2011(02), 398-408. Dostupné z: http://www.radioeng.cz/fulltexts/2011/11_02_398_408.pdf
- [6] HALL, Andrew. *TEMS iBuildNet: Ray-Tracing*. [online], 2016 . Dostupné z: <http://www.tems.com/blog/item/74-tems-ibuildnet-ray-tracing>
- [7] PEÑA, J. E. A. *Correlation analysis of propagation models for the design of a LTE - A network*. 2016 IEEE International Engineering Summit, II Cumbre Internacional de las Ingenierias (IE-Summit), Boca del Rio, 2016, pp. 1-5.
- [8] CHOI, J., H. OH a H. C. JEON. *Propagation Prediction for LTE Small Cells with Antenna Beam Tilt*. 2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall), Vancouver, BC, 2014, pp. 1-5.
- [9] MOHANTY, S. a S. MISHRA. *Performance evaluation of wireless propagation models for long term evolution using NS-3*. 2015 International Conference on Man and Machine Interfacing (MAMI), Bhubaneswar, 2015, pp. 1-5.
- [10] GEIER, James T. *Wireless LANs*. Vyd. 2. Indianapolis, IN: Sams, 2001. ISBN 0672320584.
- [11] VERMA, L., M. FAKHARZADEH a S. CHOI. *Wifi on steroids: 802.11AC and 802.11AD*. IEEE Wireless Communications, vydání 20, číslo 6, str. 30-35, Prosinec 2013.

- [12] McNAMARA, D., C. PISTOTIUS a J. MALHERBE. *Introduction to the Uniform Geometrical Theory of Diffraction*. Artech House, 1990
- [13] HOLM, P. D. *A new heuristic UTD diffraction coefficient for nonperfectly conducting wedges*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, srpen 2000.
- [14] LUEBBERS, R. J. *Finite conductivity uniform GTD versus knife edgediffraction in prediction of propagation path loss*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, leden 1984.
- [15] *Effects of building materials and structures on radiowave propagation above about 100 MHz*. ITU-R s. 2040-1, červenec 2015.
- [16] *Network Simulator NS-3*. [online] 2015. Dostupné z: <https://www.nsnam.org/overview/what-is-ns-3/>
- [17] MEZZAVILLA, M., M. ZHANG a S. RANGAN. *5G mmWave Module for the ns-3 Network Simulator*. 2 MetroTech Center, 11211, Brooklyn, New York: NYU Polytechnic School of Engineering, 2015, 1-8.
- [18] FORD, R., M. ZHANG, S. DUTTA, M. MEZZAVILLA, S. RANGAN a M. ZORZI. *A Framework for End-to-End Evaluation of 5G mmWave Cellular Networks in ns-3*. Brooklyn, New York, USA; Padova, Italy: New York University, University of Padova, 2016, 1-8.
- [19] ZHANG, M., M. POLESE, M. MEZZAVILLA, S. RANGAN a M. ZORZI. *ns-3 Implementation of the 3GPP MIMO Channel Model for Frequency Spectrum above 6 GHz*. Brooklyn, New York, USA; Padova, Italy: New York University, University of Padova, 2017, 1-8.
- [20] ZEMAN, K. M.STUSEK, J. POKORNY, P. MASEK, J. HOSEK a S. ANDREEV. S. *Emerging 5G Applications over mmWave: Hands-on Assessment of WiGig Radios*. In Proceedings of the 40th International Conference on Telecommunication and Signal Processing, TSP 2017. 1. 2016. s. 1-5. ISBN: 978-1-5090-1287-9.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

AP	přístupový bod – Acces Point
CQI	indikátor kvality kanálu – Channel Quality Indicator
GHz	jednotka kmitočtu – Gigahertz
Gbps	gigabit za sekundu - Gigabite per second
IP	Internet Protokol
LAN	lokální počítačová síť – Local Area Network
LOS	viditelná vzdálenost – Line of Sight
LTE	mobilní sítě čtvrté generace – Long Term Evolution
MAC	součást linkové vrstvy modelu ISO/OSI – Media Access Control
MCS	modulovací a kódové schéma - Modulation and Coding Scheme
MHz	jednotka kmitočtu – Megahertz
MIMO	technika více-anténní komunikace – Multiple Input Multiple Output
NLOS	blok mezi vysílačem a přijímačem – Non Line of Sight
OFDM	ortogonální multiplex s frekvenčním dělením – Orthogonal Frequency Division Multiplexing
SHF	velmi vysoké frekvence – Super High Frequency
SINR	poměr signálu ku šumu a rušení – Signal to Interference plus Noise Ratio
TCP	komunikační protokol na transportní vrstvě – Transmission Control Protocol
TTI	délka přenášeného slotu – Transmission Time Interval
UML	grafický jazyk – Unified Modeling Language
WiFi	bezdrátová síť – Wireles Fidelity

A OBSAH PŘÍLOŽENÉHO CD

Příložené CD obsahuje elektronickou verzi této práce ve formátu PDF, dále pak složky obsahující soubory se 3D modelem. Příložen je i soubor s grafickým znázorněním výsledků simulace získané pomocí Matlabu od kolegů z Tampere University of Technology. Na CD se nachází také složka se soubory ke scénářům provedených simulací a konečně složka s výsledky simulací v podobě grafů.

Obsah CD je tedy následující:

- xolber01.pdf – elektronická verze této práce
- 3D model – složka se soubory modelu
 - FEKT_T12_5.NP.dwg – výkres modelu v AutoCadu
 - FEKT_T12_5.NP.stl – uzavřený model patra
 - FEKT_T12_5.NP_no_roof.stl – otevřený model patra
- Coverage_1.pdf – grafické zpracování výsledků první zkušební simulace
- mmwave – složka se soubory obsahující zdrojový kód simulovaných scénářů
 - mmwave-fymac.cc – zdrojový kód ke scénáři fyzické vrstvy
 - mmwave-tcp.cc – zdrojový kód ke scénáři TCP
 - mmwave-udp.cc – zdrojový kód ke scénáři UDP
- výsledky – složka se soubory obsahující výsledky simulací v podobě grafů
 - avg_thrpt_fymac.pdf – graf závislosti průměrné přenosové rychlosti fyzické vrstvy na vzdálenosti vysílače od přijímače
 - avg_thrpt_tcp.pdf – graf závislosti průměrné přenosové rychlosti protokolu TCP na vzdálenosti vysílače od přijímače
 - avg_thrpt_udp.pdf – graf závislosti průměrné přenosové rychlosti protokolu UDP na vzdálenosti vysílače od přijímače
 - fymac_sinr.pdf – graf závislosti průměrné hodnoty SINR fyzické vrstvy na vzdálenosti vysílače od přijímače
 - tcp_sinr.pdf – graf závislosti průměrné hodnoty SINR protokolu TCP na vzdálenosti vysílače od přijímače
 - udp_sinr.pdf – graf závislosti průměrné hodnoty SINR protokolu UDP na vzdálenosti vysílače od přijímače